



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

LCS에 의한 전기추진장치용 하이브리드 전력원의 에너지관리 연구

A Study on Energy Management of Hybrid Power Source for
Electric Propulsion System by LCS



2019 年 2 月

韓國海洋大學校 大學院

기관공학과

張 在 希

본 논문을 장재희의 공학박사 학위논문으로 인준함

위원장 : 유 희 한



위 원 : 소 명 옥



위 원 : 오 진 석



위 원 : 조 관 준



위 원 : 정 성 영



2018 년 12 월 24 일

한국해양대학교 대학원

목 차

Nomenclature	iii
List of Tables	v
List of Figures	vi
Abstract	x

1. 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 동향	2
1.3 연구 목표 및 내용	4

2. 전기추진시스템과 에너지 관리 시스템

2.1 전기추진시스템 개요	7
2.2 선박의 에너지 관리 시스템	18

3. 부하분석을 통한 가상선박 설계

3.1 대상 선박 제원 및 데이터 수집 개요	25
3.2 부하 데이터 분석	26
3.3 부하분석에 의한 발전기-배터리 용량 선정	33
3.4 가상선박의 전기추진시스템 용량 선정	45

4. 부하제어시스템의 부하제어 알고리즘

4.1 부하제어 알고리즘의 목표	48
4.2 모드 탐색과 모드별 특징	50
4.3 에너지 계수 산정	61
4.4 전기추진시스템의 부하제어 알고리즘	64

5. 시뮬레이션	
5.1 시뮬레이션 구성	71
5.2 시뮬레이션 결과	75
5.3 시뮬레이션 결과 분석	94
6. 결론	96
참고문헌	98
부 록 1 : 항차별 부하에 따른 자기조직화지도 수행결과	102
부 록 2 : 항차별 전력관리시스템 시뮬레이션 결과	116
부 록 3 : 항차별 부하제어시스템 시뮬레이션 결과	123
감사의 글	130

Nomenclatures

α	: 부하율 [%]
β	: 부하의 유효전력에 대한 피상전력의 비 [무차원수]
η_c	: 엔진출력-추진전동기출력 변환효율 [무차원수]
η_L	: 총 부하의 종합 효율 [%]
σ	: 전력의 표준편차 [kW]
$\cos \theta$: 정격역률 [무차원수] (0~1)
AF	: 가용성계수 [무차원수]
AL	: 보조부하 [kW]
B_{avg}	: 시뮬레이션 결과로 도출되는 배터리 용량 평균값 [kWh]
B_{diff}	: 시간에 따른 배터리 부담 전력 [kW]
$B_{diff,avg}$: B_{diff} 의 평균값 [kW]
$B_{diff,max}$: B_{diff} 의 최대값 [kW]
$B_{diff,min}$: B_{diff} 의 최소값 [kW]
C	: 부하 기동계수 [무차원수]
$C_{battery}$: 가상선박의 배터리용량 [kWh]
CF	: 용량계수 [무차원수]
cr	: C-rate [C]
DF	: 수요계수 [무차원수]
EE	: 에너지효율성 계수 [무차원수]
EF	: 에너지유연성 계수 [무차원수]
f	: 전력 주파수 [Hz]
g	: 발전기 대수 [대]
i	: 항차 [무차원수]
j	: 데이터 순서 [무차원수]
k	: 안전계수 [무차원수]
LF	: 부하계수 [무차원수]
$LR_{\geq N}$: 발전기 부하율 [%]
M	: 격자 개수 [개]
N	: 관측 데이터 개수 [개]
n	: 항차별 측정 데이터 개수 [개]
rv	: 동기기의 회전속도 [rpm, (r/min)]
op_1	: 시스템의 최적부하 운용점 중 첫 번째 운용점 [kW]
op_2	: 시스템의 최적부하 운용점 중 두 번째 운용점 [kW]

op_n	: 시스템의 최적부하 운용점 중 n 번째 운용점 [kW]
p	: 극수 [무차원수]
p_1	: 부하분석에서 도출한 최빈부하소요전력 중 첫 번째 소요전력값 [kW]
p_2	: 부하분석에서 도출한 최빈부하소요전력 중 두 번째 소요전력값 [kW]
p_3	: 부하분석에서 도출한 최빈부하소요전력 중 세 번째 소요전력값 [kW]
p_4	: 부하분석에서 도출한 최빈부하소요전력 중 네 번째 소요전력값 [kW]
P_{ar}	: 보조부하율 [%]
$P_{e.p}$: 추진전동기로 변환된 추진부하 [kW]
P_e	: 요구 전력여유율 [kW]
$P_{gen, avail}$: 발전기 여유부하 [kW]
P_k	: k 번째 발전기의 현재 부하 [kW]
P_L	: 총 부하량 [kVA]
P_m	: 최대기동전력을 갖는 부하 출력 [kW]
P_{max}	: 최대사용전력 [kW]
P_{mean}	: 평균사용전력 [kW]
P_{min}	: 발전필요최소용량 [kW]
$P_{m.p}$: 엔진의 추진부하 [kW]
P_{pr}	: 추진부하율 [%]
P_{op}	: 발전기 최적부하 운용점 [kW]
P_{rated}	: 장비의 정격전력 [kW]
P_{tl}	: 시간에 따른 부하 [kW]
$P_{total, peak}$: 추진부하와 전력부하 통합 최대부하
PF	: 총 부하역률 [%] (0~1)
PF_S	: 최대기동전력을 갖는 부하 기동시 역률 [무차원수] (0~1)
PG_1	: 정상상태에서 전력공급에 필요한 용량 [kVA]
PG_2	: 허용전압강하를 고려한 용량 [kVA]
PG_3	: 출력 차가 최대가 되는 부하 기동시 발전기 용량 [kVA]
PL	: 추진부하 [kW]
SOC_{batt}	: 배터리 잔량 [kWh]
t	: 측정시간 [h]
$t_{a.t.g}$: 전력생산이 가능한 시간 [h]
TL	: 전체부하 [kW]
ΔV	: 발전기 투입 시 허용전압 강하율 [%]
W	: 총사용전력량 [kWh]
W_{max}	: 최대사용전력량 [kWh]
X_d	: 발전기 정수 [무차원수]

List of Tables

Table 1	System features and configuration of ship propulsion system	8
Table 2	Advantages and disadvantages of mechanical propulsion system and electric propulsion system	9
Table 3	Electric propulsion system configuration by ship type	15
Table 4	Environmental regulations related to battery system	16
Table 5	Ships using battery as main or auxiliary power source	17
Table 6	Specification of target ship	25
Table 7	Acquisition data list	26
Table 8	Reference case of generator load	38
Table 9	Selected generators capacity combinations	39
Table 10	Optimal load operation by generator combination case	40
Table 11	Battery capacity by generator combination case(3)	44
Table 12	Generators and battery system capacity of virtual container ship ..	45
Table 13	System configuration of virtual ship	48
Table 14	Step for performing SOM	53
Table 15	Selection of grid according to voyage case	54
Table 16	Characteristic of mode of propulsion system operation	59
Table 17	Modes of propulsion system operation	60
Table 18	Step-by-step control of the LCS algorithm	66
Table 19	Determine mode according to load ratio and total load	67
Table 20	Required load margin according to mode	67
Table 21	Results of fuel consumption and battery level	95

List of Figures

Fig. 1 Emission control area and ship emission regulation	1
Fig. 2 Research contents	5
Fig. 3 Construction diagram of electric propulsion system	10
Fig. 4 Example of SFC curve of diesel generator	11
Fig. 5 Propulsion system configuration of shuttle tanker	14
Fig. 6 Propulsion system configuration of ice breaking shuttle tanker	14
Fig. 7 Functional diagram of EMS	20
Fig. 8 How to manage energy demand	21
Fig. 9 Functional diagram of LCS	23
Fig. 10 Configuration of electric propulsion system of virtual container ship	25
Fig. 11 Energy conversion efficiency of electric propulsion system	27
Fig. 12 Auxiliary power usage ratio in operation of more than one generator	28
Fig. 13 Propulsion power usage ratio in operation of main engine	29
Fig. 14 Total power usage ratio in operation	30
Fig. 15 Operation ratio of ship speed	30
Fig. 16 Example of electric power load analysis	31
Fig. 17 Distribution of the total load at the all state	32
Fig. 18 Charging and discharging trend by generator combination case	41
Fig. 19 Battery capacity by generator combination case(1)	42
Fig. 20 Battery capacity by generator combination case(2)	43
Fig. 21 Configuration of LCS and EMS	47
Fig. 22 Classification of data mining techniques	51
Fig. 23 Concept of low dimensional map transformation of SOM	52
Fig. 24 Results of SOM of voyage 1	55
Fig. 25 Load and load ratio due to changes in total load	56
Fig. 26 Load and ship speed due to changes in total load	57
Fig. 27 Load change due to the variation of the auxiliary load ratio	58
Fig. 28 Load change due to the variation of the propulsion load ratio	58

Fig. 29	LCS algorithm based on load analysis	65
Fig. 30	Load sharing algorithm of LCS	68
Fig. 31	Simulation program of electric propulsion system	72
Fig. 32	LCS model of simulation program	73
Fig. 33	PMS model of simulation program	73
Fig. 34	Generator model of simulation program	74
Fig. 35	BMS and Battery model of simulation program	74
Fig. 36	Load scenario and distribution panel model of simulation	75
Fig. 37	Load scenario of voyage 1	76
Fig. 38	Total load controlled by PMS of voyage 1	77
Fig. 39	Total load controlled by LCS of voyage 1	77
Fig. 40	Generator load controlled by PMS of voyage 1	78
Fig. 41	Generator load controlled by LCS of voyage 1	78
Fig. 42	Battery SOC controlled by PMS of voyage 1	79
Fig. 43	Battery SOC controlled by LCS of voyage 1	79
Fig. 44	Load scenario of voyage 25	80
Fig. 45	Total load controlled by PMS of voyage 25	80
Fig. 46	Total load controlled by LCS of voyage 25	81
Fig. 47	Generator load controlled by PMS of voyage 25	81
Fig. 48	Generator load controlled by LCS of voyage 25	82
Fig. 49	Battery SOC controlled by PMS of voyage 25	82
Fig. 50	Battery SOC controlled by LCS of voyage 25	83
Fig. 51	Load scenario of voyage 48	83
Fig. 52	Total load controlled by PMS of voyage 48	84
Fig. 53	Total load controlled by LCS of voyage 48	84
Fig. 54	Generator load controlled by PMS of voyage 48	85
Fig. 55	Generator load controlled by LCS of voyage 48	85
Fig. 56	Battery SOC controlled by PMS of voyage 48	86
Fig. 57	Battery SOC controlled by LCS of voyage 48	86

Fig. 58 Load scenario of voyage 50	87
Fig. 59 Total load controlled by PMS of voyage 50	87
Fig. 60 Total load controlled by LCS of voyage 50	88
Fig. 61 Generator load controlled by PMS of voyage 50	88
Fig. 62 Generator load controlled by LCS of voyage 50	89
Fig. 63 Battery SOC controlled by PMS of voyage 50	89
Fig. 64 Battery SOC controlled by LCS of voyage 50	90
Fig. 65 Load scenario of voyage 51	90
Fig. 66 Total load controlled by PMS of voyage 51	91
Fig. 67 Total load controlled by LCS of voyage 51	91
Fig. 68 Generator load controlled by PMS of voyage 51	92
Fig. 69 Generator load controlled by LCS of voyage 51	92
Fig. 70 Battery SOC controlled by PMS of voyage 51	93
Fig. 71 Battery SOC controlled by LCS of voyage 51	93
Fig. 72 Battery level of result of simulation	94
Fig. 73 Fuel consumption of result of simulation	95
Fig. 74 Results of SOM(1)	102
Fig. 75 Results of SOM(2)	103
Fig. 76 Results of SOM(3)	104
Fig. 77 Results of SOM(4)	105
Fig. 78 Results of SOM(5)	106
Fig. 79 Results of SOM(6)	107
Fig. 80 Results of SOM(7)	108
Fig. 81 Results of SOM(8)	109
Fig. 82 Results of SOM(9)	110
Fig. 83 Results of SOM(10)	111
Fig. 84 Results of SOM(11)	112
Fig. 85 Results of SOM(12)	113

Fig. 86 Results of SOM(13)	114
Fig. 87 Results of SOM(14)	115
Fig. 88 Results of PMS simulation(1)	116
Fig. 89 Results of PMS simulation(2)	117
Fig. 90 Results of PMS simulation(3)	118
Fig. 91 Results of PMS simulation(4)	119
Fig. 92 Results of PMS simulation(5)	120
Fig. 93 Results of PMS simulation(6)	121
Fig. 94 Results of PMS simulation(7)	122
Fig. 95 Results of LCS simulation(1)	123
Fig. 96 Results of LCS simulation(2)	124
Fig. 97 Results of LCS simulation(3)	125
Fig. 98 Results of LCS simulation(4)	126
Fig. 99 Results of LCS simulation(5)	127
Fig. 100 Results of LCS simulation(6)	128
Fig. 101 Results of LCS simulation(7)	129

A Study on Energy Management of Hybrid Power Source for Electric Propulsion System by LCS

Jae Hee, Jang

Department of Marine Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

To protect the marine environment, the International Maritime Organization is strengthening regulations on ship emissions such as sulfur oxides, nitrogen oxides, and carbon dioxide. In addition, according to the 4th industrial revolution, research on the application of ICT(Information and Communications Technologies) and artificial intelligence technology such as Big Data and IoT are proceeding in shipbuilding and marine fields; therefore, an electric propulsion system that is easy to monitor and control with its base technology is required. Consequently, the future development of ship technologies that enhance energy efficiency while satisfying marine regulations on emission is expected.

The purpose of this study is to improve the performance of the load control system (LCS) algorithm applied to an electric propulsion system. An LCS reduces energy by increasing the power generation efficiency of generators through load sharing in generators and batteries. The LCS has been applied to the power systems of mechanical propulsion systems. As ship propulsion systems move from mechanical to electrical, the propulsion load is integrated into the power load. To apply LCS to the electric propulsion system, additional load analysis and improved LCS algorithms are required considering the load condition.

In this study, an LCS for the electric propulsion system was applied to a container ship. Hitherto, no electric propulsion system has been applied to container ships; as such, a virtual electric propulsion system was designed and applied to the container ship. In the power system design process, the generator and battery capacity were designed to operate the generator at the highest efficiency power range through load analysis.

In the LCS algorithm improvement process, the total power load (including the propulsion and auxiliary loads) was analyzed through load analysis. Through the load analysis using a self-organizing map, the load data were classified into several clusters and the characteristics of the load could be extracted. An algorithm that divides modes by the load characteristics and control them according to the load characteristics was added. The ship load condition data were collected and used to calculate the energy coefficients, energy flexibility, and energy efficiency. Energy flexibility refers to the ability of the generator-battery system to supply power to load fluctuations. Energy efficiency refers to the ability of the generator to produce power at the highest efficiency power range. Energy flexibility and energy efficiency were applied to the load sharing control of the LCS between the generator and battery. Finally, an improved LCS algorithm was evaluated by simulation using the virtual electric propulsion system model.

KEY WORDS: Electric propulsion system 전기추진시스템; Energy Management System 에너지 관리시스템; Load Control System 부하제어시스템; Load analysis 부하분석

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 해양 환경보호를 위해 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 이산화탄소(CO₂) 등의 선박 배기가스 배출 규제를 강화하고 있다. 황산화물 배출 규제는 2015년도 이후 배출 통제 구역의 경우 0.1% 이하로 유지되고 그 외 모든 해역에 대해서는 0.5%로 기존 대비 90% 수준으로 감축되었다. 질소화합물 배출 규제의 경우, 2015년도 5월을 기준으로 Tier I~Ⅲ로 나누어 규제가 순차적으로 강화되어 현재는 Tier Ⅲ를 적용하여 기존 대비 80% 수준으로 감축되었다. 이산화탄소 배출 규제는 신조선의 에너지효율설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI)를 기준으로 감축을 추진하고 있다[1]. 또한 최근 국내 미세먼지의 주요 원인 중 하나가 선박으로부터 배출되는 배기가스라는 보고가 발표되면서 선박과 항만에 대한 미세먼지 감축 정책을 마련하고 있는 상황이다. 이에 따라 향후 선박에서는 이러한 선박 배출가스 환경 규제를 충족하면서 에너지 효율성을 높이는 기술 개발연구가 활발해질 것으로 보인다. Fig. 1은 배출가스 규제 중 하나인 배출규제 해역(Emission Control Area, ECA)에 대해서 설명한다.

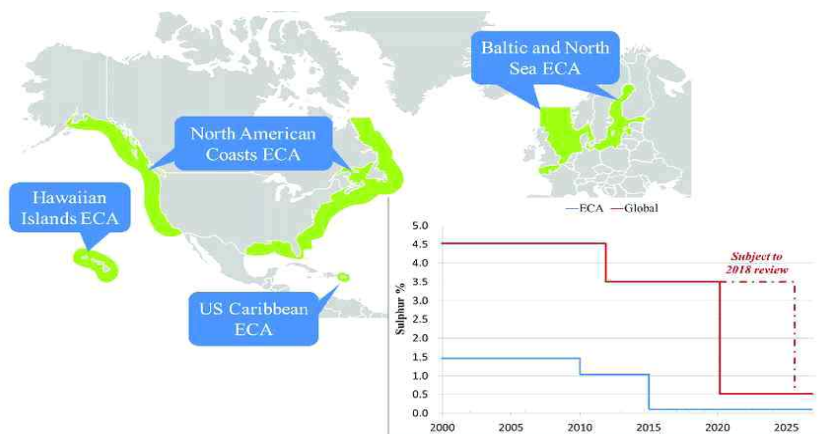


Fig. 1 Emission control area and ship emission regulation

선박의 배출가스 규제의 대응할 수 있는 관련 기술로는 연료 소모를 줄일 수 있는 운항 메커니즘, 선박 탑재 장비의 효율화, 친환경 선박 기술 적용 등이 있으며, 전기추진시스템을 적용하면 전력 활용의 효율성을 높이고 선박 입출항시 배터리를 사용하여 배기가스 배출을 줄이는 등 환경 규제에 대응이 가능하다.

기존 전기추진시스템은 소음이 적은 장점과 포드형(pod-type) 추진 시스템¹⁾과 함께 사용되어 기동성, 접안성능이 좋은 점을 특징으로 여객선, 해양플랜트 등의 특수선을 중심으로 발전되어 왔으며, 무기체계와 전력체계간의 에너지 유연성이 요구되는 함정에도 적용되고 있다. 최근에는 에너지 변환장치의 발전으로 에너지 변환 효율이 높아지고 장비의 생산 가격이 낮아지면서, 전기추진시스템의 에너지 절감 및 전력체계 효율성 향상 측면이 부각되고 있고 친환경 기조와 맞물려 전기추진시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한, 4차 산업혁명에 따라 조선·해양 분야에서도 빅데이터, 사물인터넷 등의 ICT 기술 및 인공지능 기술 적용에 대한 연구가 진행되면서 기반기술로 모니터링 및 제어 관리가 용이한 전기추진시스템이 요구되고 있다[2].

따라서 전기추진시스템의 친환경성 및 정보통신기술 (Information and Communications Technologies, ICT) 적용 측면의 장점을 활용하기 위해서는 에너지관리시스템(Energy Management System, EMS)의 선박의 에너지 상태 모니터링 기술이 요구되며 부하제어시스템(Load Control System, LCS)을 통한 효율적인 부하분배 메커니즘에 대한 연구가 필요하다.

1.2 연구 동향

1.2.1 국외 동향

노르웨이, 영국, 미국 등을 중심으로 환경, 에너지 등의 다양한 측면에서

1) 포드형 추진시스템 : 별도의 조작장치없이 추진기와 조타장치의 기능을 겸하고 있는 추진시스템. 포드 본체 내에 추진전동기를 가지고 있으며, 방향을 조종할 때는 포드 본체를 좌우로 회전시켜서 추진기를 구동함으로써 선박의 추진력을 얻는다.

새로운 개념의 전기추진 선박에 관한 연구가 본격화 되고 있다. 국제적으로는 온실가스 감축에 따른 환경 규제를 강화하고 있고, 국가별로는 국제해사기구와 관련 국가의 승인 하에 배출가스 규제를 더욱 강화하는 제도인 배출규제 해역을 설정하고 운영하고 있다. 다음은 전기추진선박과 관련한 국외 연구 동향을 나타낸다.

- FellowSHIP Project 통해 수소가스 기반 연료전지로부터 추진동력을 얻는 OSV(Offshore Supply Vessel)인 M/V Viking Lady를 건조하여 운항 중임
- 북유럽 지역에서는 다양한 형태의 가스연료 전기추진시스템이 적용된 선박이 운항되고 있으며, 대부분 2~3시간 정도 소요되는 단거리 운항 페리선 또는 여객선인 것으로 파악됨
- 2017년 11월, 중국은 세계 최초 2,000톤급의 전기로만 운항하는 전기추진 선박을 진수하였음[4]
- 노르웨이는 세계 최초로 배터리로만 운항하는 Ampere호를 건조하여 운용을 시작 (2015년)하였고, Oppedal-Lavik 사이의 약 5.6 km를 약 20분씩, 하루 편도 34회로 운항하고 있으며, 2018년 4월부터 100 % 전기로 가동하여 온실가스를 배출하지 않는 페리선을 운항할 계획임[5]

전기추진 선박은 추진효율개선을 통해 연비향상과 환경규제 문제를 동시에 해결할 수 있는 대안으로 선진국을 중심으로 연구되고 있으며, 특히 저전압 (1,000 V 이하) 선박이 가지고 있는 한계점인 전력효율문제, 신뢰성문제, 공간 문제 등을 개선하기 위한 전기추진시스템 연구가 병행되고 있다.

1.2.2 국내 동향

국내의 경우, 전기추진선박에 대한 연구 실적이 부족한 상황으로 소형 레저 선박 및 어선에 대해서 전기추진을 적용하는 연구단계에 있다. 최근 강화되는 환경 규제에 따라 LNG 연료를 사용하는 선박과 전기추진에 대한 관심이 늘어나면서 디젤과 전기의 하이브리드 선박 등에 대한 연구개발이 정부 주도로 진행되고 있다. 다음은 국내에서 수행된 전기추진선박 관련 연구 동향이다.

- 2010년 소형 태양광 추진 레저보트 선형개발에 관한 연구가 수행됨
- 2010년부터 2016년까지 해수부에서 추진한 이사부호 건조 사업으로, 전기추진시스템을 탑재한 연구선 이사부호를 개발하여 해양과학연구에 활용 중
- 2011년 쌍동형 전기추진어선 선형개발에 관한 연구가 수행됨
- 2015년 50 kW 연료전지와 배터리 조합의 하이브리드 방식의 50인승 유람선이 정부 연구과제로 개발됨

이와 같이 국내 전기추진선박에 대한 연구는 소형 레저보트 및 어선을 중심으로 수행되어 왔으며 연구선 및 유람선과 같은 특수선에 적용된 사례가 있으나 상선에는 적용된 사례가 없다. 최근에는 친환경 선박 기술 수요에 따라 LNG 연료를 사용하는 전기추진시스템을 연안 선박에 적용하는 연구에 대한 관심이 늘어나고 있다.

1.3 연구 목표 및 내용

본 연구에서는 컨테이너선을 대상으로 전기추진시스템을 적용한 가상의 선박을 모델링하고, 부하제어 알고리즘을 적용하여 에너지의 효율적인 활용과 에너지 절감을 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다. 본 연구는 다음 Fig. 2와 같이 구성되었다.

본 연구의 최종목표는 전기추진시스템의 에너지관리를 위한 부하제어시스템 알고리즘 연구이다. 기존의 기계식추진시스템에 적용된 부하제어시스템이 갖는 발전기 최적부하운용구간 운전 알고리즘을 분석하고, 전기추진시스템에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 전기추진시스템에서는 추진부하가 전력부하로 포함되기 때문에 전력운용모드의 재정립이 필요하게 된다. 따라서 측정된 부하 데이터 군집화를 통해 부하특성에 따른 제어모드를 결정할 수 있도록 하였고, 에너지 계수를 제안하여 에너지유연성과 에너지효율성을 수치적으로 판단할 수 있게 하였다. 이를 바탕으로 전기추진시스템의 발전기와 배터리간의 부하분배 제어를 효율적으로 수행할 수 있도록 부하제어 알고리즘을 보완하였다.

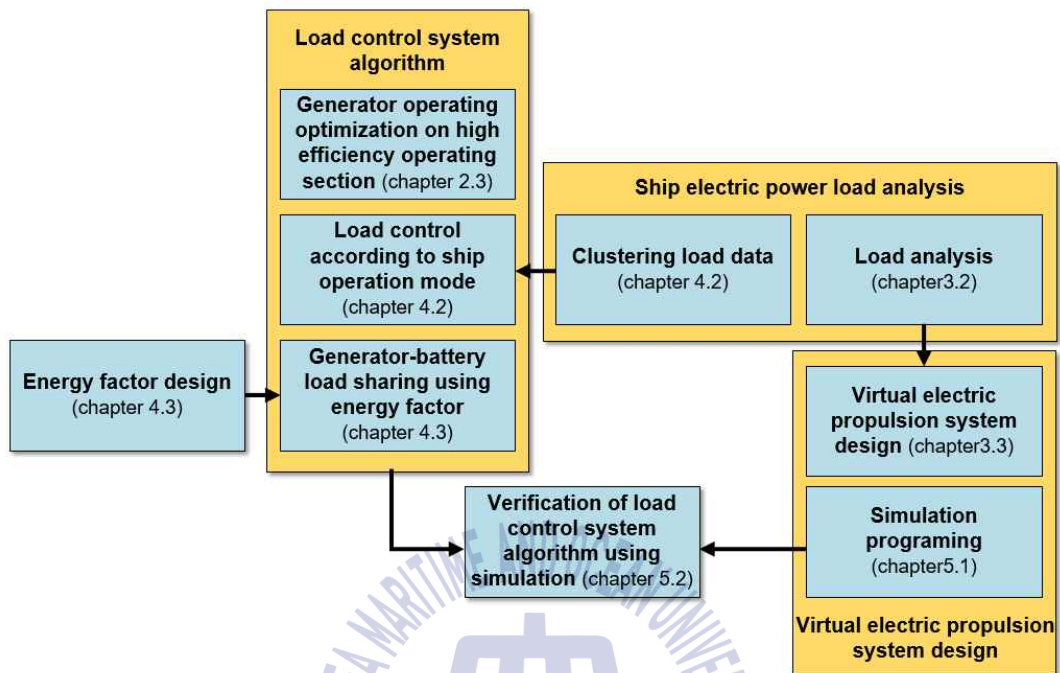


Fig. 2 Research contents

1장에서는 연구배경과 목적, 그리고 연구 내용에 대한 전반적인 설명하였다.

2장에서는 전기추진선박의 에너지관리시스템과 부하제어시스템에 대하여 분석하였다.

3장에서는 컨테이너선을 대상으로 부하분석을 통해 가상선박의 전기추진시스템을 설계하였다. 3장에서 설계된 가상선박의 전기추진시스템은 5장에서 부하제어시스템 알고리즘의 제어기능을 확인하는데 활용된다.

4장에서는 부하분석과 에너지 계수를 이용한 전기추진시스템의 부하제어 알고리즘을 제안하였다. 부하클러스터링을 이용한 부하분석을 통해 부하 데이터 기반으로 운용모드를 나누고 결과를 부하제어시스템 알고리즘에 적용한다. 또한 에너지계수를 제안하여 발전기-배터리 간의 부하분배 제어를 수행하도록 알고리즘을 보완하였다.

5장에서는 앞서 3장에서 설계한 가상선박의 전기추진시스템을 MATLAB Simulink를 이용하여 모델링하고 4장에서 제안한 알고리즘을 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

마지막으로 6장에서는 연구의 결과와 결론을 제시하였다.



제 2 장 전기추진시스템과 에너지관리시스템

2.1 전기추진시스템 개요

선박의 대형화, 탑재장비의 증가 등으로 선박의 부하는 지속적으로 증가하고 있다. 선박에 전기추진시스템을 적용하여 추진시스템과 전력시스템 통합을 통해 에너지 활용의 유연성을 높이게 되면, 추진용 엔진과 발전기 원동기를 각각 설계하는 것에 비해 작은 용량으로 전체 시스템에 전력 공급이 가능한 발전기 설계가 가능해진다는 장점이 있다. 전기추진 기반의 크루즈 선박을 예로 들면 선박의 서비스부하 및 DPS(Dynamic Positioning System)와 같은 추진시스템 및 그 보조부하가 모두 전기 에너지로 구동된다. 이 경우, 선박의 운용모드에 따라 추진부하를 줄여 선내 서비스 부하로 활용이 가능해진다. 이와 같이 미래 선박의 전력시스템은 선박의 부하 변화에 따라 즉각적으로 대응이 가능해야 하며 신뢰성과 안전성을 확보해야 한다. 또한, 경제적 관점에서는 연료소비효율을 높이고 대기오염 물질의 배출을 최소화해야 한다.

2.1.1 선박추진시스템과 전기추진시스템

전기추진시스템이란 원동기로부터 축을 통해 추진기를 구동하는 기존의 기계식 추진체계와 다르게, 원동기로 발전기를 구동하여 생산한 전력으로 추진전동기를 작동시키고 그 동력으로 추진기를 구동하는 방식이다. Table 1은 기계식 추진시스템과 전기추진시스템의 기본 구성을 비교한 표이다. 기계식 추진시스템은 가장 일반적으로 사용되어온 추진시스템으로, 에너지 변환 단계 없이 선박의 추진시스템과 전력시스템이 분리되어 운용된다. 따라서 선박 내 전력공급과 추진동력이 별도로 계산되어 선박 설계가 되어야 한다. 복합식 추진시스템은 넓은 속도 범위와 진동 및 소음 감소가 요구되는 함정에 주로 적용된다. 주 추진엔진으로는 높은 기동성을 가지고, 추진전동기로는 저속에서 높은 조종성능과 정속성을 확보할 수 있다. 전기추진시스템은 추진시스템과 전력시스템이 통합되어 추진동력을 전력으로 공급받는 시스템으로, 복합식 추진시스템의 추진전동기 운용모드가 갖는 높은 조종성능과 진동 및 소음 저감과 더불어 선박의 운용에 따라 에너지 분배를 조정할 수 있다는 장점을 갖는다.

Table 1 System features and configuration of ship propulsion system

추진방식	구성도
기계식 추진시스템 : 선내 전력을 공급하는 전력시스템과 추진시스템이 완전히 분리됨	
복합식 추진시스템 : 원동기를 통한 추진과 전동기를 통한 추진을 병행함(군함 등의 특수선)	
전기추진시스템 : 추진시스템과 선내 전력시스템의 전력원이 통합됨	

전기추진시스템은 기존 기계식 추진시스템에서 분리되어 있던 전력부하와 추진부하를 통합하여 전력을 공급하는 방식으로 운용함으로써 우선순위에 따라 전력 공급 비율을 조정할 수 있다. 여기에 배터리와 같은 에너지 저장 시스템을 추가로 운용한다면, 발전시스템의 발전 상태에 따라 배터리에서 충·방전을 함으로써 발전시스템의 고효율 운용과 에너지 절감이 가능해진다. 특히, 레일건과 같은 고출력 무기를 탑재하는 함정에서는 유연성 높은 에너지 운용이 요구되기 때문에 슈퍼커패시터와 발전기를 조합하여 고출력 펄스 부하의 운용이 가능하도록 전력시스템을 설계 한다. 이 외에도 전기추진시스템은 기계식 장비 운용을 줄여 모니터링 및 유지보수가 용이해지고, 따라서 친환경 자율운항 선박의 기반 기술로 활용할 수 있다. Table 2는 전기추진시스템이 갖는 장·단점을 나타낸 표이다.

Table 2 Advantages and disadvantages of mechanical propulsion system and electric propulsion system[6]

구분	기계식 추진체계	전기식 추진체계
추진체계	<ul style="list-style-type: none"> - 원동기와 추진기가 축으로 직접 연결됨 	<ul style="list-style-type: none"> - 원동기에서 발전기를 통해 발전한 전력을 전동기로 전달하여 전동기에서 동력으로 변환 - 전동기에서 프로펠러는 기계적으로 연결됨
선박설계 유연성	<ul style="list-style-type: none"> - 주 추진축에 의해 기관실 배치가 제한적 	<ul style="list-style-type: none"> - 주기관 배치 유연성 - 기관실 용적이 감소하여 화물 적재량 증가
선박 조종 용이성	<ul style="list-style-type: none"> - 원동기 구동을 통해 발생시킨 동력을 추진축으로 전달하여 최종적으로 추진기를 구동하기 때문에 조종성능이 떨어짐 	<ul style="list-style-type: none"> - 전기추진기 구동에 의해 선박 추진이 가능하므로, 조종성능 향상 (자동화, 지능화가 가능해짐)
소음 및 진동	<ul style="list-style-type: none"> - 고소음, 고진동 	<ul style="list-style-type: none"> - 대부분의 선박 기기들을 전기모터에 의해 작동시키므로 선내 진동과 소음이 대폭 감소
설치비용	<ul style="list-style-type: none"> - 구조가 간단하여 가격이 저렴 	<ul style="list-style-type: none"> - 고가장비 (pod등)으로 인해 비쌈
에너지효율	<ul style="list-style-type: none"> - 원동기에서 축을 통해 바로 프로펠러로 연결되므로, 축에서 발생하는 기계적 손실만 존재 	<ul style="list-style-type: none"> - 원동기에서 전력으로 변환 후 전동기에서 다시 추진동력으로 변환되므로 변환 손실이 존재 - 발전기의 부하를 제어하여 에너지 효율 향상이 가능
친환경성	<ul style="list-style-type: none"> - 주로 선박 연료유를 사용하여 SO_x, CO_2, PM등 배출량이 큼 	<ul style="list-style-type: none"> - 발전기의 고효율 운전 및 배터리 적용을 통해 배출가스 저감이 유리

2.1.2 전기추진시스템의 구성

전기추진시스템은 일반적으로 Fig. 3과 같이 디젤엔진과 교류발전기(alternator)로 구성된 발전시스템과 주배전반, 변압기, 주파수변환기, 추진전동기, 추진기로 구성되며, 설계 요구 사양에 따라 기어박스가 추가된다.

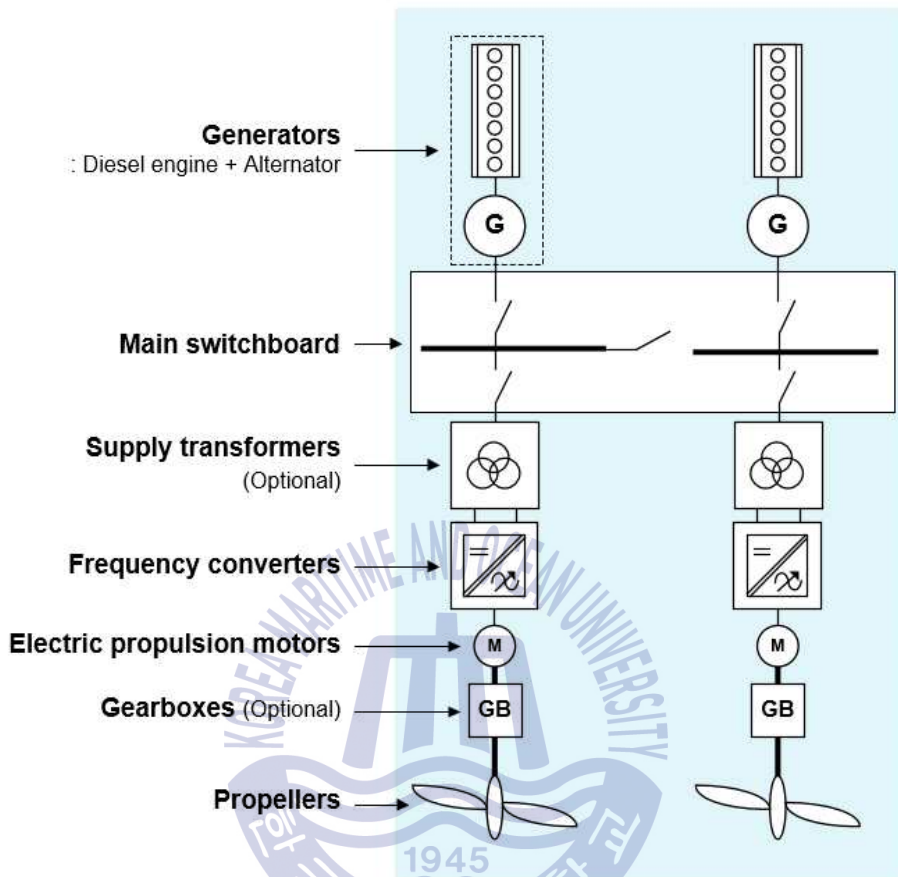


Fig. 3 Configuration diagram of electric propulsion system

(1) 발전기

전력시스템의 전력공급장치는 디젤엔진, 가스엔진, 스팀터빈엔진 등에 의해 구동되는 발전기이다. 전기추진시스템에서 발전용으로 주로 사용되는 디젤엔진은 기계식 추진시스템에 사용되는 정격 저속 엔진보다 무게가 적고 비용이 낮은 중·고속 엔진이다. 디젤엔진의 경우 최적운용범위²⁾에서는 약 200 g/kWh의 연료소비율을 가지고 있으며, 연료 효율이 높은 축에 속한다. 또한 부하가 연속최대출력(Maximum Continuous Rating, MCR)의 50 % 이하가 되면

2) 최적운용부하는 발전기 출력에 따른 연료소비특성(Specific Fuel Consumption, SFC)이 낮은 부하율 범위를 의미한다. 일반적으로 발전기 부하율의 75~85 % 부하율에 위치하며, 단위 출력당 연료소비율이 낮게 측정되며 효율이 높음을 의미한다.

효율이 매우 떨어지게 된다. 이 상태에서는 불완전 연소가 일어나며 NO_x 및 SO_x 함량이 높은 배출가스가 만들어진다. 따라서 전기추진시스템에서 배출가스를 줄이고 에너지 효율을 높이기 위해서는 원동기로 사용하는 디젤엔진을 최적운용범위에서 운전하여 유지하는 것을 목표로 해야 한다. 다음 Fig. 4는 디젤발전기의 SFC(Specific Fuel Consumption) 곡선을 나타낸다.

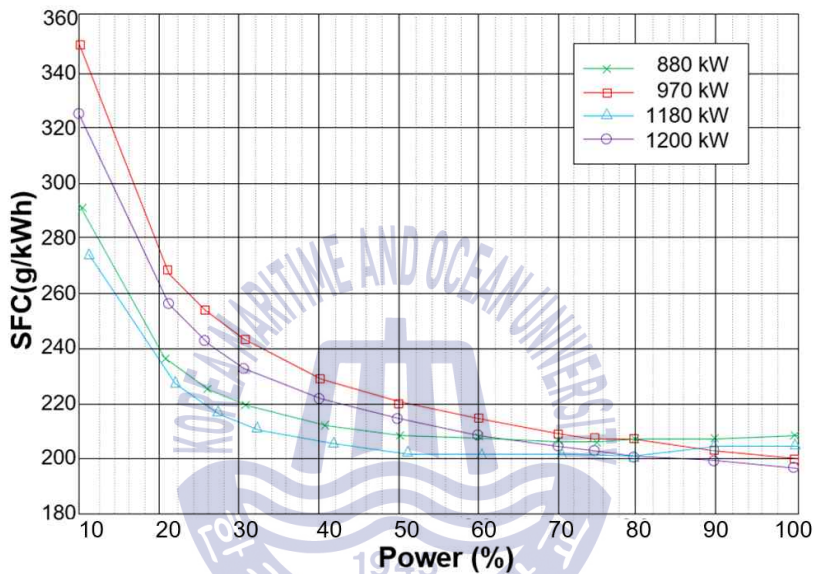


Fig. 4 Example of SFC curve of diesel generator

대부분의 선박의 전력시스템은 교류 배전을 가지고 있으며, 전력시스템의 주파수는 발전기를 따라가게 된다. 발전기 유도전압의 주파수는 다음 식 (1)과 같다[8].

$$f = \frac{p}{2} \cdot \frac{rv}{60} \tag{1}$$

여기서, f 는 발전기 주파수 [Hz], p 는 극수[무차원수], rv 는 동기 발전기의 회전속도 [rpm, (r/min)]를 의미한다.

(2) 배전반

발전기 배전반은 이중화를 위해서 2~4개로 구성된다. 누전 상황뿐만 아니라 화재 또는 수해 등으로 인한 고장을 가정하여 설계된다. 선박에서 발전되는 전력량이 많을 경우, 시스템에 따라 고전압부와 저전압부로 나뉘어 처리된다. 다음은 선박 배전반에서 일반적으로 사용되는 전압을 나타낸다.

- ① 11 kV : 고전압으로 분류된다. 총 발전기 용량이 20 MW를 초과하는 경우, 모터의 용량이 400 kW 이상인 경우 사용한다.
- ② 6.6 kV : 고전압으로 분류된다. 총 발전기 용량이 4~20 MW인 경우, 모터의 용량이 300 kW 이상일 때 사용된다.
- ③ 690 V : 저전압으로 분류된다. 총 발전기 용량이 4 MW 미만인 경우 사용된다.

(3) 변압기

변압기는 선박 구역에 따라 전압을 높이거나 낮추는 장치이다. 일반적으로 교류전압에서 교류전압으로 바꾸는 장치를 의미하여, 선박 내 시스템이 요구하는 전압에 따라 다른 전압레벨을 얻거나 주파수 변환을 통해 위상을 변화시킬 수 있다.

(4) 추진전동기

전동기는 전기에너지를 기계에너지로 변환하는데 가장 일반적으로 사용되는 장치이다. 전기추진시스템에서 전동기는 추진 전동기, 스러스터(thruster) 뿐 아니라 윈치, 펌프, 팬 등과 같은 기타 선내부하에서도 사용되며 일반적으로 선박 내 부하 중에서 70~90 %는 전동기가 차지한다. 선박에서 주로 사용되는 전동기는 다음과 같다.

- ① 직류전동기 : 직류 전원을 공급받아 작동하는 전동기로, 3상 교류 시스템을 사용하는 전력시스템에서는 사이리스터 정류기를 통해 직류 전원을 공급하게 된다.

- ② 유도전동기 : 견고하고 설계가 단순하여 고장이 적어 유지보수에 유리하여, 추진전동기 이외의 다양한 시스템에 활용된다. 전력시스템에 직접 연결하여 정속전동기로 활용하거나, 주파수 변환을 통해 가변속 전동기로 활용이 가능하다.
- ③ 동기전동기 : 일반적으로 5MW이상의 대용량에서 유도전동기보다 경제성을 가지게 되므로 대형 추진전동기로 주로 활용된다.
- ④ 영구자석형 동기전동기 : 크기가 작고 높은 효율을 가지고 있어 pod 추진기로 주로 활용이 되며, 해군 함정, 잠수함 등 특수 목적에 주로 사용된다.

이 중 추진전동기로 주로 사용되는 것은 유도전동기와 동기전동기이다. 최근에는 희토류계 재료의 발달로 선박에 적용할 수 있는 대용량 영구자석형 동기전동기에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

2.1.3 발전기-추진전동기-바우슬러스터 용량 구성

기존 전기추진시스템은 주로 특수선과 여객선을 중심으로 적용되어 왔다. 본 연구에서는 컨테이너선을 대상으로 전기추진시스템을 적용하고자 하여, 기존 전기추진시스템의 발전기-추진전동기-바우슬러스터(bow thruster) 용량에 대해서 선행 조사를 수행하였다[8].

(1) 셔틀탱커(Shuttle tanker)

4,000 kW 디젤 발전기 4대와 12,000 kW의 추진전동기 1대, 3,000 kW 바우슬러스터 2대와 1,700 kW 바우슬러스터 2대로 구성된다. 사이클로컨버터(cyclo-converter)를 통해 주파수를 변환하여 추진전동기를 제어한다. 사이클로컨버터는 저속, 대용량 추진시스템에 적합하며, 토크 맥동이 적고 역률이 우수하여 추진전동기의 크기를 줄일 수 있는 장점이 있다. 총 발전용량 대비 추진전동기의 출력이 75%를 차지한다. 다음 Fig. 5는 셔틀탱커의 추진시스템 구성도이다[19].

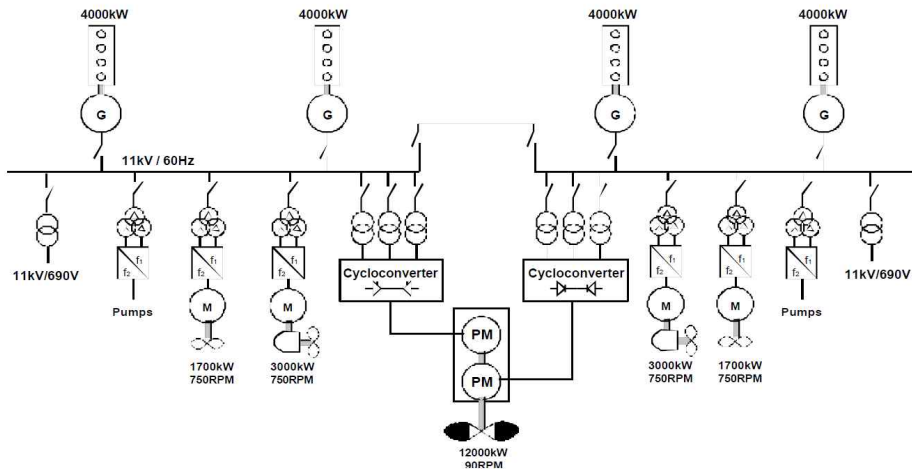


Fig. 5 Propulsion system configuration of shuttle tanker

(2) 쇄빙셔틀탱커(Ice breaking shuttle tanker)

1,700 kW 가스발전기 1대, 4,000 kW 디젤 발전기 2대, 6,000 kW 디젤 발전기 2대와 8,000 kW의 Azipod 2대, 1,750 kW 바우스러스터 2대로 구성된다. 주 추진시스템인 azipod는 사이클로컨버터로 제어되며, 총 발전용량 대비 추진전동기의 출력이 73.7%를 차지한다. Fig. 6은 쇄빙셔틀탱커의 추진시스템 구성도이다[19].

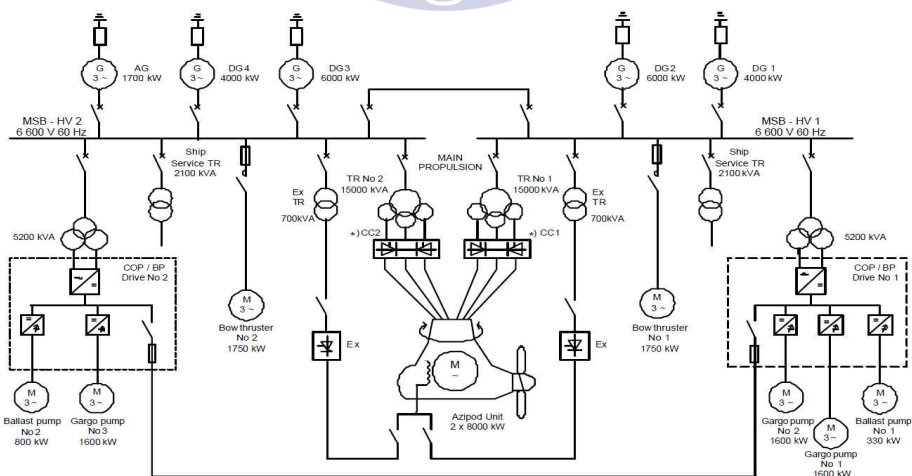


Fig. 6 Propulsion system configuration of ice breaking shuttle tanker

그 외 전기추진선박의 추진시스템을 정리한 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Electric propulsion system configuration by ship type

선종	Shuttle tanker		

2.1.4 전기추진시스템의 배터리 적용

전기추진시스템에서 배터리는 선박 내 에너지를 저장 및 공급하는 에너지 저장장치로 사용될 수 있다. 특히 전기추진시스템에서 배터리의 적용은 빠른 응답, 기계소음의 감소, 낮은 배출가스와 연료절감, 시스템의 중복성(redundancy) 확보, 에너지 효율 향상, 재생에너지 적용에 용이 및 환경규제 및 정책을 충족할 수 있다는 장점이 있다. 다음 Table 4는 환경규제대응 측면에서 배터리 적용 선박의 장점을 나타내고 있다.

Table 4 Environmental regulations related to battery system[7]

해양환경규제		규제대응 측면에서 배터리 시스템의 장점
규제	기구	
- 신조선에너지효율설계지수 ³⁾ - 선박에너지효율관리계획서 ⁴⁾ - 에너지효율운영지수 ⁵⁾	- 국제해사기구 - 해양환경보호위원회 ⁶⁾	- CO ₂ 저감 및 연료 절감
- 배출가스제한구역 ⁷⁾	- 국제해사기구 - 해양환경보호위원회	- 선박 배기가스 저감 및 연료 절감
- 소음기준	- 국제해사기구 - 해사해양안전위원회 ⁸⁾	- 소음 감소
- SRP ⁹⁾	- 국제해사기구 - 해사해양안전위원회	- 시스템 중복성(redundancy) 확보 를 통한 안정성 증대
- 친환경항만	- 지역별	- 항만 내 배기가스 배출 제한

- 3) 신조선에너지효율설계지수(Energy Efficiency Design Index, EEDI) : 선박의 연비효율을 나타내는 지수로 1ton의 화물을 1해상마일을 운반할 때 나오는 CO₂의 배출량을 의미
- 4) 선박에너지효율관리계획서(Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP) : 선박의 에너지 효율 향상을 위한 계획의 수립·시행·감시·평가 및 개선 등에 관한 절차 및 방법을 기술한 계획서
- 5) 에너지효율운영지수(Energy Efficiency Operational Indicator, EEOI) : 선박의 배출가스 산정방법 중 하나로, 사용연료와 거리, 항차 등 선박의 운항 상태를 고려하여 측정된 연비지수
- 6) 해양환경보호위원회(Marine Environment Protection Committee, MEPC)
- 7) 배출가스제한구역(Emission Control Area, ECA) : 선박에서 발생하는 NO_x, SO_x, PM(Particulate Matter) 또는 이 세 가지 형태의 배출을 방지, 감소 및 통제하기 위하여 인근 당사국으로부터 국제해사기구에 통보된 지역
- 8) 해사해양안전위원회(Maritime Safety Committee, MSC)
- 9) Safe Return to Port : 일정손상범위 내에서 선박이 자력으로 인근 항구까지 피항할 수 있는 능력을 갖추도록 구획배치단계에서부터 고려하여 시스템적으로 문제가 없도록 하고 이에 대한 확인을 하는 제도

배터리는 기계식 추진시스템에서부터 적용되어 왔으며, 주로 빠른 응답특성을 활용한 전력시스템의 출력 안정화, 재생에너지와의 연동 용이성을 이용한 친환경 선박과 연계 등의 방식으로 사용되었다. 다음 Table 5는 배터리가 선박의 주전원 또는 보조전원으로 사용된 선박을 정리한 표이다.

Table 5 Ships using battery as main or auxiliary power source[8]

선박명	국가	선종	배터리 용량	인도년도
Carolyn dorothy	USA	Tug	65 kWh	2009
Edda freya	Norway	MPSV ¹⁰⁾	546 kWh	2012
Campbel foss	USA	Tug	65 kWh	2012
Viking lady	Norway	OSV ¹¹⁾	442 kWh	2013
Prinsesse benedikte	Denmark	Ferry	1.6 MWh	2013
M/V prins richard	Denmark	Ferry	2.6 MWh	2014
Bhagwan dryden	Australia	DSV ¹²⁾	130 kWh	2014
Viking queen	Norway	OSV	650 kWh	2015
Viking energy	Norway	OSV	650 kWh	2015
Savannah	Netherlands	Yacht	1 MWh	2015
Fannefjord	Norway	Ferry	410 kWh	2016
Texelstroom	Netherlands	Ferry	1.6 MWh	2016
M/V berlin	Denmark	Ferry	1.6 MWh	2016
Spirit of the sound	USA	Research vessel	91 kWh	2016
Seaspan cargo ferry	Canada	Ferry	546 kWh	2016
IJ ferry 60, 61	Netherlands	Ferry	136 kWh	2016, 2017
Elektra	Finland	Ferry	1 MWh	2017
OV Ryvingen	Norway	MPSV	3 MWh	2018
MPV 30	Norway	MPSV	882 kWh	2018

현재 가장 큰 용량의 배터리가 탑재된 선박은 Rolls-Royce와 노르웨이 조선사 Mitjar Mekaniske Verksted AS와 건조하는 다목적 선박 OV Ryvingen으로, 3 MWh의 리튬이온 배터리가 탑재되었다.

10) 다목적선박(Multi Purpose Service Vessel, MPSV)

11) 해양지원선박(Offshore Support Vessel, OSV)

12) 잠수지원선박(Diving Support Vessel, DSV)

2.2 선박의 에너지관리시스템

선박에서는 추진에 사용하는 회전동력, 선박 내 보조시스템에 사용하는 전력과 열에너지 등 다양한 에너지를 직접 또는 다른 형태로 변환하여 사용하고 있으며, 그 중 제어를 통한 에너지 관리의 주 대상이 되어온 것이 전력시스템이다. 이러한 선박 내 전력시스템의 에너지 관리를 수행하는 에너지관리시스템으로 선박의 발전기 및 중부하(heavy load) 요청에 따른 부하 우선순위 제어 등을 포함하는 전력관리시스템(Power Management System, PMS)과 배터리를 포함하는 선박의 경우, 배터리의 상태 모니터링 및 관리를 수행하는 배터리관리시스템(Battery Management System, BMS)이 있다.

기계식 추진시스템은 엔진의 회전동력을 축으로 직접 전달하여 추진기를 구동하는 방식인 반면, 전기추진시스템은 추진전동기에 전력을 공급하여 추진기를 구동하게 되므로 추진부하가 전력부하에 포함된다. 따라서 전력시스템의 에너지 효율을 높이기 위해서는 배터리 충·방전을 통한 부하 분배를 필요로 하게 되며, 전기추진시스템의 에너지관리시스템은 선박 내 부하 모니터링과 부하상태에 따른 전력관리시스템과 배터리관리시스템 간의 부하제어를 수행해야 한다. 에너지관리시스템은 전기추진시스템의 전체 에너지관리를 목적으로 시스템별 부하 절감과 더불어 부하제어시스템을 통한 선박 에너지 효율성 향상 기능을 갖는다.

2.2.1 기존 선박의 에너지관리시스템

(1) 전력관리시스템

전력관리시스템은 선박의 전력시스템을 통합적으로 관리하는 시스템으로, 발전기의 운전과 정지, 부하율 분담, 병렬운전 제어, 중부하에 대한 부하 우선순위제어 등을 수행하게 된다. 다음은 전력관리시스템의 기능을 나타내고 있다.

- ① 발전기 관리 : 선박 부하 시스템에 안정적인 전력 공급을 위해서 발전기 운전대수를 관리한다. 발전기의 작동 및 정지를 제어하고, 발전기 투입 또는 해제를 위해서 차단기를 관리하며, 병렬 발전이 필요할 시 두 대 이상의 발전기가 동기화될 수 있도록 제어한다.
- ② 중부하 관리 : 중부하 운전 요청이 발생 시, 발전기의 상태를 확인하여 추가되는 중부하의 용량에 따라서 발전기의 추가운전 등을 결정하여 중부하 운용이 가능하도록 전력을 확보한다.
- ③ 선박의 부하군 분류와 부하 관리 알고리즘 : 부하를 우선순위로 분류하여 발전기 부담이 높은 경우 비중요부하부터 차단하여 중요부하를 보호하는 알고리즘을 갖는다.

(2) 배터리관리시스템

배터리관리시스템은 배터리의 전압, 전류, 온도 등을 측정하여 배터리 상태를 모니터링 하는 기능, SOC(State Of Charge) 모니터링 기능, 과충전 및 과방전에 대한 보호기능, 과전류에 대한 보호기능, 배터리 셀의 균등한 충전을 위한 셀밸런싱(cell balancing)등의 기능을 갖는다.

2.2.2 에너지관리시스템

전기추진시스템의 에너지 효율을 높이기 위해서는 추진부하를 포함하는 선내 전체 에너지를 관리하는 에너지관리시스템이 요구된다. 에너지관리시스템은 선내 전력 시스템을 모니터링 하여 발전기가 최적 부하상태를 유지할 수 있도록 발전시스템 및 에너지 저장 시스템(배터리 등)과 부하시스템(추진부하 및 선내 서비스 부하 등)을 관리한다.

본 연구에서는 전기추진시스템에 에너지관리시스템을 적용하기 앞서 선박 운항 데이터를 기반으로 전기추진시스템 용량을 설계한다. 부하를 분석하여 운항 모드에 따라 발전기가 최적 효율에서 운용할 수 있는 발전기 용량 및 구성을 설계하고, 시뮬레이션을 통해 발전기가 최적 효율 구간을 유지할 수 있도록 배터리 용량 설계를 수행한다. 다음 Fig. 7은 에너지관리시스템의 기능을 나타낸 것이다.

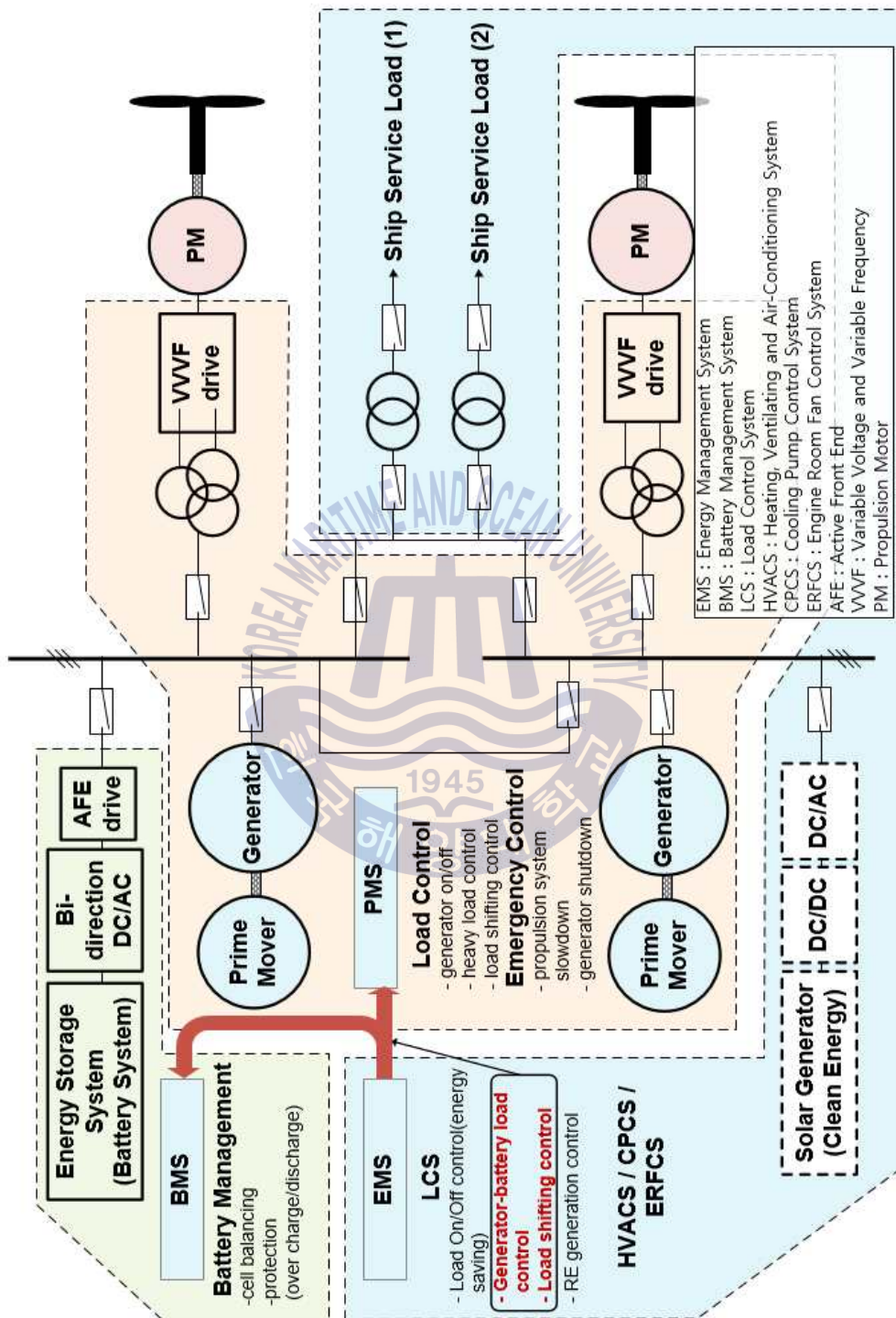


Fig. 7 Functional diagram of EMS

에너지관리시스템은 선박의 에너지 상태에 따라 하위 시스템인 부하제어시스템, CPCS(Cooling Pump Control System), ERFCS(Engine Room Fan Control System), HVACs(Heating, Ventilating, and Air-Conditioning System)를 통합 모니터링 및 제어하는 시스템이다. ERFCS, CPCS, HVACs의 경우, 선박 내 부하시스템의 에너지 절감을 목표로 하고 있으며, 부하제어시스템의 경우 전기추진시스템의 부하관리를 목표로 한다. 따라서 부하제어시스템은 기존 선박에서 전력관리를 하는 전력관리시스템과 배터리관리시스템 간의 적절한 부하 분배를 통해서 전력관리시스템이 최적 부하를 분담 받아 발전기를 운전하고, 배터리가 발전기 최적 운전을 지원할 수 있도록 제어한다.

2.2.3 부하제어시스템

부하제어관리시스템은 선박에서 발전기와 배터리간의 최적 에너지 관리를 목표로 하는 시스템으로, 에너지 수요관리를 수행하게 된다. 에너지 수요 관리 방법에는 최대부하 감소(peak shaving), 저부하 방지(valley filling), 부하 분배(load sharing) 등이 있으며, 시스템의 특성과 환경 조건에 따라 전략적으로 수행하게 된다. 다음 Fig. 8은 에너지 수요관리 방법을 나타내고 있다[9].

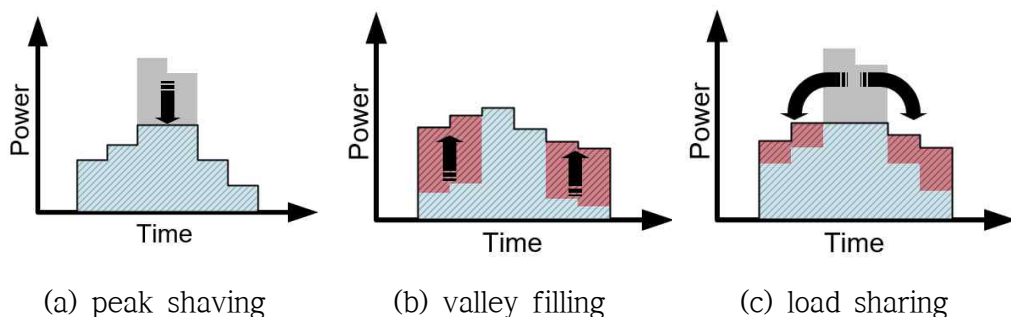


Fig. 8 How to manage energy demand

(1) 최대부하 감소

일반적으로 발전기 여유율을 초과하는 중부하가 발생할 경우, 발전기를 추가로 운전하게 된다. 최대부하 감소를 통한 에너지 관리 방법은 발전기를 추가 운전하지 않고, 발전기 부하율을 초과하는 비중요 부하를 일시적으로 차단함으로써 발전기의 추가 운전을 막을 수 있게 한다.

(2) 저부하 방지

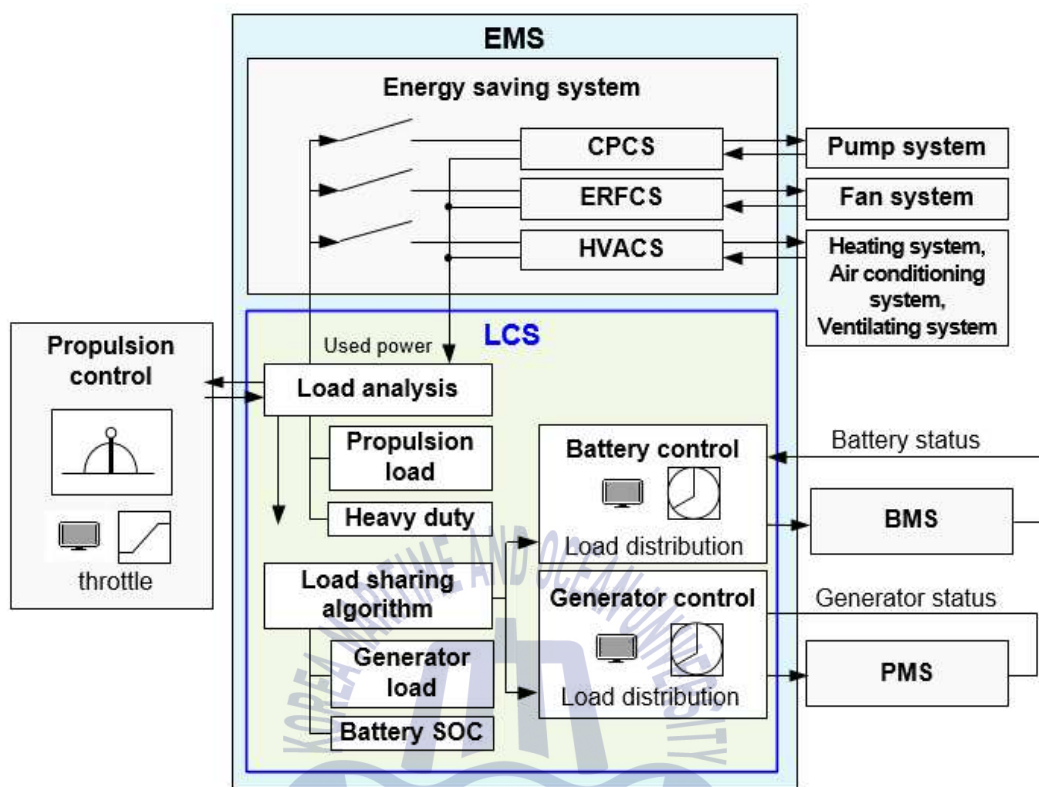
발전기가 저부하 상태로 운전하게 되면 연료량 대비 전력 생산량은 줄어들게 되며 이는 발전 효율의 감소를 의미한다. 저부하 방지를 통한 에너지 관리는 전략적으로 부하를 높여 발전기가 높은 효율 구간에서 운용할 수 있게 하는 방법으로, 배터리 충전, 부하 운용 스케줄 관리 등이 포함된다.

(3) 부하분배

부하분배를 통한 에너지 관리 방법은 최대부하 감소와 저부하 운전 방지를 결합한 방법으로, 에너지 저장 시스템을 함께 운용하여, 피크부하를 저감하고 부하가 발전기의 최적 발전 효율구간에서 운용되도록 한다.

기계식 추진시스템에서는 기존의 전력관리시스템이 추진시스템을 제외한 전력시스템을 대상으로 부하제어관리를 수행한 반면, 전기추진시스템에서는 추진시스템이 전력시스템에 통합되면서 에너지관리시스템이 관리해야하는 전력 부하의 범위가 넓어졌다. 이에 따라 전기추진시스템의 장점을 살리는 에너지 관리를 위해서 기존 전력관리시스템이 갖는 중부하 관리, 발전기 관리에 추가적으로 추진부하 및 에너지 저장 시스템을 포함하는 에너지 수요 관리 개념의 부하제어시스템이 필요하다. 다음 Fig. 9는 에너지관리시스템에서 부하제어시스템의 기능을 나타낸 것이다.

에너지관리시스템의 하위시스템으로는 에너지 절감을 목표로 하는 CPCS, ERFCS, HVACs가 있고, 에너지의 효율적인 분배를 통해 에너지 절감을 목표로 하는 부하제어시스템이 있다. 부하제어시스템은 추진부하 및 선내 보조부하 데이터를 수집하여 배터리관리시스템과 전력관리시스템 간의 부하 분배를 수행한다.



EMS : Energy Management System
 CPCS : Cooling Pump Control System
 ERFCS : Engine Room Fan Control System
 HVACS : Heating, Ventilating and Air-Conditioning System
 LCS : Load Control System
 BMS : Battery Management System
 PMS : Power Management System
 SOC : State Of Charge

Fig. 9 Functional diagram of LCS

제 3 장 부하분석을 통한 가상선박 설계

전기추진시스템은 속도 운용 범위가 넓거나 소음 및 진동 저감이 요구되는 특수선을 중심으로 적용되어 왔다. 컨테이너선과 같은 상선은 경제속도에 맞춰 운항하기 때문에 전기추진시스템의 부하제어에 따른 에너지 절감 효과가 상대적으로 작을 수 있으나, 최근 배출가스에 대한 규제와 자율운항선박에 대한 논의가 증가하면서 상선에 전기추진시스템을 적용하는 방안 대한 관심 또한 증가하고 있는 추세이다. 상선에 전기추진시스템이 적용된 사례는 2017년 중국에서 근거리 운항을 목적으로 2,400 kWh의 리튬이온 배터리를 적용한 석탄 화물선이 있다[4]. 따라서 현재는 전기추진시스템을 적용한 컨테이너선에 대한 충분한 데이터가 없는 상황이다.

본 연구에서 부하제어 알고리즘을 적용하고자 하는 대상선박은 발전기와 배터리를 전력원으로 하는 전기추진시스템이 적용된 컨테이너선이다. 실제로는 전기추진시스템이 적용된 컨테이너선이 존재하지 않기 때문에, 본 연구에서는 기계식 추진시스템이 적용된 컨테이너선으로부터 수집한 전력 데이터와 추진 동력 데이터를 바탕으로 가상의 전기추진선박을 모델링하여 연구에 활용한다. 데이터를 수집한 대상 선박은 디젤엔진을 동력원으로 하는 기계식 추진시스템을 갖는 6,800 TEU(Twenty-foot Equivalent Unit) 컨테이너선이다. 본 절에서는 측정된 추진부하를 전력부하로 변환하여 전체 부하를 분석하고, 발전기와 배터리를 설계하여 전기추진시스템으로 구성된 가상의 컨테이너선을 설계하였다. Fig. 10은 본 절에서 목표로 하는 가상 선박의 전기추진시스템을 나타낸다.

가상 선박은 크게 발전기, 추진전동기, 배터리, 선내 부하로 구성된다. 데이터를 수집한 실제 선박의 경우, 디젤엔진으로 추진하는 기계식 추진시스템으로 엔진 출력, 토크, 축속도 및 선속이 수집되었다. 따라서 데이터 전처리 단계에서 변환효율을 적용하여 추진부하를 전력부하로 변환하여 분석을 진행하였다. 최종적으로는 부하분석을 통해 전기추진시스템으로 변환 시 적합한 발전기 용량과 배터리 용량을 설계하였다.

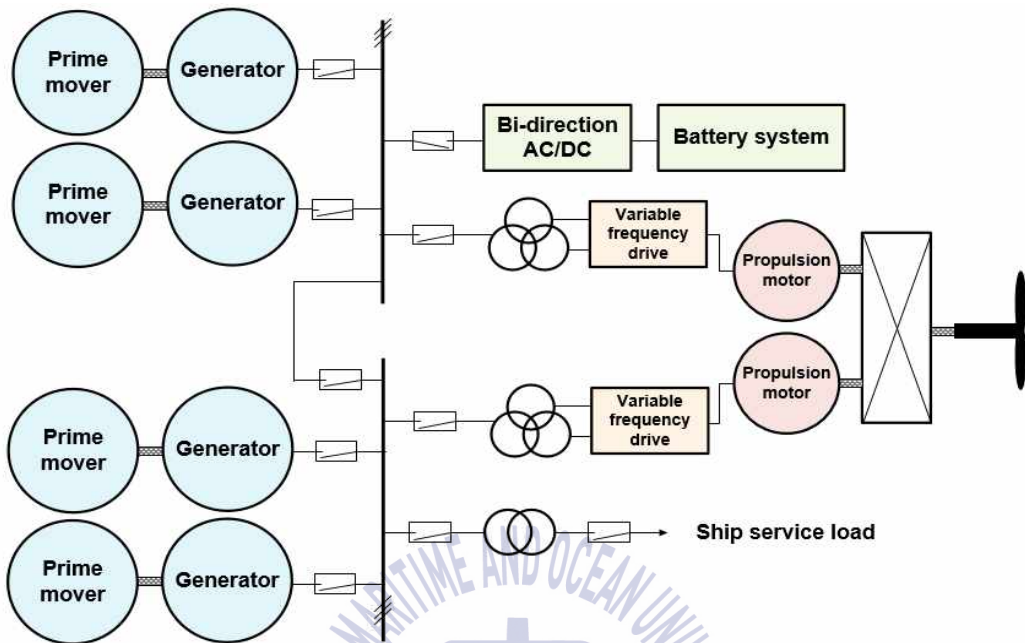


Fig. 10 Configuration of electric propulsion system of virtual container ship

3.1 대상 선박 제원 및 데이터 수집 개요

3.1.1 대상선박의 제원

대상선박은 6,800 TEU 컨테이너선으로 69 MW MAN-B&W 디젤엔진 1대로 추진하며, 3,000 kW 발전기 4개로 구성된다. 대상선박의 제원은 다음 Table 6에 정리하였다.

Table 6 Specification of target ship

선종	컨테이너선
길이	299 m
폭	40 m
흘수	13.5 m
엔진출력	68,520 kW / 93,120 Bhp
발전기출력	3,000 kW (4대)
최대속도	25 knot
TEU / 냉동컨테이너 수	6,732 / 550

3.1.2 데이터 수집 개요

선박 부하분석을 목적으로 발전기의 출력, 부하율 등의 전력데이터와 엔진의 출력, 속도 등의 데이터를 수집하였다. 데이터는 2014년 11월부터 2015년 12월까지, 약 411일간 수집되었으며, 데이터의 수집주기는 10분이다. 다음 Table 7은 수집한 데이터를 정리한 표이다.

Table 7 Acquisition data list

No.	신호명	단위
1	측정 시각	YYYY-MM-DD-TT
2	1번 발전기 부하	kW
3	1번 발전기 부하율	%
4	1번 발전기 운전/정지	1/0
5	2번 발전기 부하	kW
6	2번 발전기 부하율	%
7	2번 발전기 운전/정지	1/0
8	3번 발전기 부하	kW
9	3번 발전기 부하율	%
10	3번 발전기 운전/정지	1/0
11	4번 발전기 부하	kW
12	4번 발전기 부하율	%
13	4번 발전기 운전/정지	1/0
14	발전기 여유 전력	kW
15	주엔진 운전/정지	1/0
16	선속	knot
17	주엔진 토크	kgf · m
18	주엔진 축속도	r/min
19	주엔진 제동마력	hp

3.2 부하 데이터 분석

부하 데이터 분석의 목적은 부하제어 알고리즘의 적용 대상인 전기추진시스템 모델을 도출하는 것이다. 기계식 추진시스템이 적용된 실제 선박의 실측 데이터를 바탕으로 가상의 전기추진시스템을 모델링하기 위해서 엔진 출력 데이터를 전력 추진부하로 변경하고, 선내 전력데이터와 통합하여 분석을 진행한다. 분석 결과를 바탕으로 가상의 컨테이너 선박 전기추진시스템의 발전기와 배터리 용량을 제안한다.

3.2.1 엔진 출력 데이터의 전처리

전기추진시스템과 기계식 추진시스템은 시스템 구성과 이에 따른 동력 전달의 관점에서 전달 효율에 차이가 발생한다. 기계식 추진시스템의 경우, 원동기의 출력이 축을 통해 추진기로 직접 전달된다. 반면 전기추진시스템의 경우, 원동기의 출력으로 전력을 생산하여 전력선을 통해 추진전동기로 전달된다. 동일한 출력에 대해서 전기추진시스템이 기계식추진시스템보다 변환 과정을 많이 거치게 되며, 따라서 기계식 추진시스템보다 변환효율이 떨어진다. 데이터를 수집한 대상 선박은 기계식 추진시스템으로 본 연구에서 활용하기 위해서 전력시스템으로 변환하여 분석한다. 다음 Fig. 11에 엔진 출력 데이터 전처리를 위해 엔진 사용 시 효율과 추진전동기 사용 시 효율을 비교하였다[10~11].

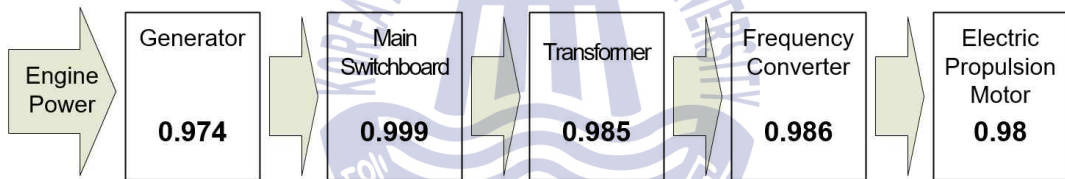


Fig. 11 Energy conversion efficiency of electric propulsion system

엔진 사용 시 효율은 축 효율인 0.97을 적용하였으며, 추진전동기 사용 시 효율은 발전기 효율과 변환기 효율, 추진전동기 효율 및 축 효율을 고려하여 0.89를 적용하였다. 엔진 사용 시 효율을 제하고 추진전동기 사용 시 효율을 적용하여 다음 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$P_{e.p} = 0.75 \times \eta_c \times P_{m.p} \quad (2)$$

여기서, $P_{e.p}$ 는 추진부하(추진전동기)[kW], η_c 는 변환효율[무차원수]로 0.92를 적용하였으며, $P_{m.p}$ 는 추진부하(엔진)[hp]이다.

3.2.2 실측 부하분석

엔진 출력데이터의 전처리를 통해 도출된 추진부하를 포함하는 선박 내 전력부하에 대해서 분석을 진행하였다. 기존 선박 데이터에서 추진부하를 전력부하로 변환하여 포함시켰기 때문에 기존의 전력부하와 추진부하가 포함된 전력부하를 구분하기 위해서 기존의 전력부하를 보조부하로 표현한다. 다음은 본 절에서 사용하는 부하에 대한 의미이다.

- ① 보조부하(기존 시스템의 전력부하) : 추진부하를 제외한 선내 전력부하를 의미한다.
- ② 추진부하 : 전력에너지로 운용되는 추진부하를 의미한다.
- ③ 전체부하 : 선박 내 전력에너지로 운용되는 총 부하로, 보조부하와 추진부하의 합으로 나타낸다.

(1) 보조부하(기존 시스템의 전력부하)

발전기가 1대 이상 운전 중인 상태에 대하여 전력별 사용 비율을 나타내면 다음 Fig. 12와 같다.

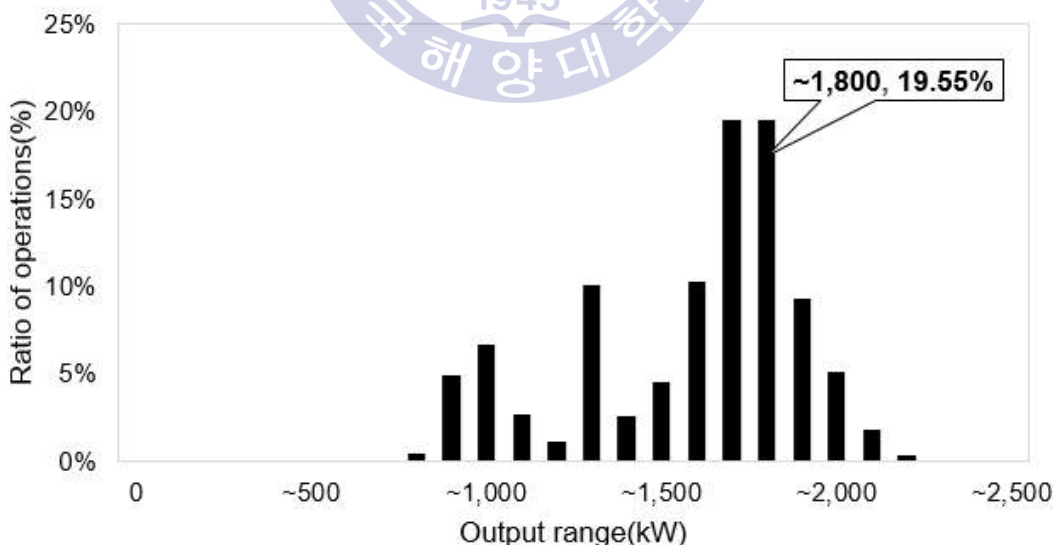


Fig. 12 Auxiliary power usage ratio in operation of more than one generator

선박 서비스 부하를 담당하는 발전기는 최소 500 kW에서 최대 4,400 kW 범위에서 운용되었다. 그 중 1,600 kW~1,800 kW 범위에서 높은 비율로 운용되었다.

(2) 추진부하

주 엔진이 운전 중인 상태에 대하여 출력별 사용 비율을 나타내면 다음 Fig. 13과 같다. Fig. 13의 출력은 전력으로 변환한 엔진 출력을 의미한다.

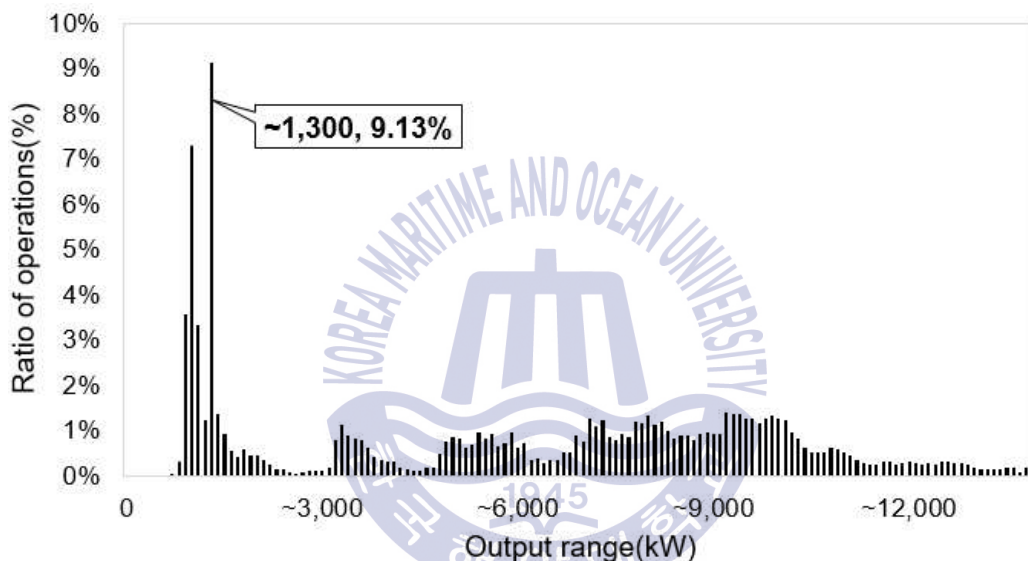


Fig. 13 Propulsion power usage ratio in operation of main engine

추진시스템은 최소 600 kW에서 최대 18,700 kW 범위에서 운용되었으며, 1,300 kW 범위에서 높은 비율로 운용되었다. 항해 중의 사용하는 추진부하의 범위가 넓게 분포하기 때문에 입출항 시 주로 사용하는 1,200~1,300 kW 부하 범위의 사용빈도가 상대적으로 높게 나타났다.

(3) 전체부하

보조부하와 추진부하를 합한 전체부하는 최소 500 kW에서 20,300 kW 범위에서 운용되었으며, 1,300 kW 범위에서 높은 비율로 운용되었다. 이러한 경향은 추진시스템의 운용 전력이 그 외 전력시스템의 운용 전력보다 높기 때문이다. 다음 Fig. 14는 전체부하의 전력구간별 사용 비율을 나타낸다.

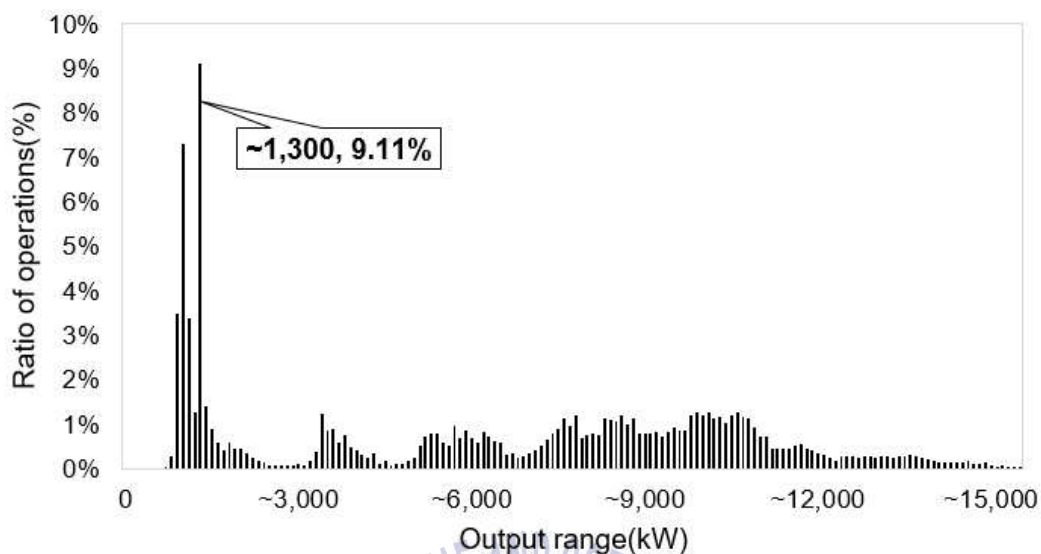


Fig. 14 Total power usage ratio in operation

(4) 선속

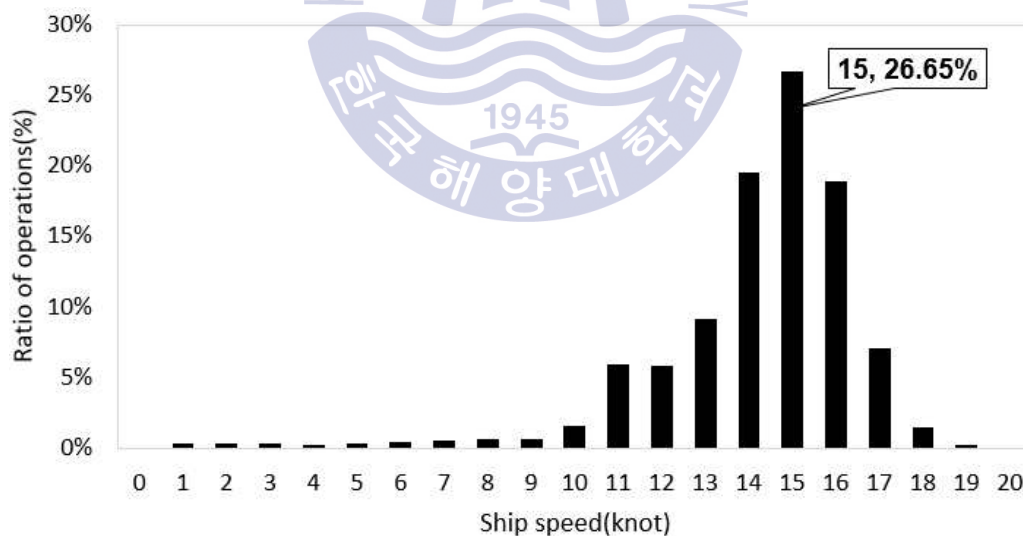


Fig. 15 Operation ratio of ship speed

Fig. 15는 대상선박의 선속을 나타낸다. 대상 선박은 최대속도가 25 knot이고, 15 knot에서 높은 비율로 운용되었다.

3.2.3 운용모드에 따른 부하 분포

기존 부하제어 알고리즘은 운용모드를 기준으로 중부하 운용 등을 고려하여 여유전력을 확보한다. 선박의 운용모드는 기본적으로는 항해(seagoing), 입출항(harbour), 정박(port)으로 나누어진다. 여기에 컨테이너선의 경우 선·하적(load/unload 또는 cargo handling) 등 선박의 목적과 기능에 따라 운용모드가 추가된다. 운용모드에 따라 개략적으로 다음과 같은 전력 사용 특징을 갖는다.

- ① 항해 : 총 사용 전력에서 대부분이 추진부하에 해당됨
- ② 입출항 : 바우스러스터 등의 중부하를 사용
- ③ 정박 : 육상 전력을 사용가능한 상태로 육상 전력 공급 여부에 따라 선박에서 전력을 공급 하는 앵커링(anchoring)과 AMP(Alternate Maritime Power)등의 육상시설에서 전력을 공급받는 육전연결(shore connection) 상태가 있음

TOTAL LOAD TABLE														
			AT SEA			AT PORT			AT EM'CY			REMARK		
CONTINUOUS LOAD (1)			MOTOR RATING			LOAD			AT SEA					
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T			AT SEA INPUT X			AT PORT		
			NO. OF SET			INPUT X EFF T								

선박에 따른 운용모드 구분은 설계단계의 부하분석(load analysis)에서 정의하는 모드를 참고한다. 부하분석자료는 선박의 부하에 대해서 선박 내 부하 사용을 부하의 운용율을 나타내는 부하계수(load factor)와 정격부하를 사용하여 나타내며, 선박의 운용모드에 따라 구분되어 발전기 용량선정, 배전반 설계, 전력케이블 크기 선정 등 전력시스템의 설계 자료로 활용된다. Fig. 16은 부하분석표의 예시이다. 앞서 엔진 출력데이터의 전처리를 통해 도출된 추진부하를 포함하는 선박 내 전력부하에 대해서 분석을 진행하였다. 실시간 데이터에서 운용모드는 로그표를 기준을 분류하였으며, 따라서 선·하적 상태는 정박에 포함되었다.

발전기 및 배터리 용량을 설계하기 위해서 전체부하를 추가로 분석하였다. 높은 빈도로 운용되는 부하범위에 발전기를 맞춰 설계한다면 발전기가 높은 비율로 고효율 구간에서 운전되며, 부하분배를 위한 배터리의 용량 또한 감소시킬 수 있다.

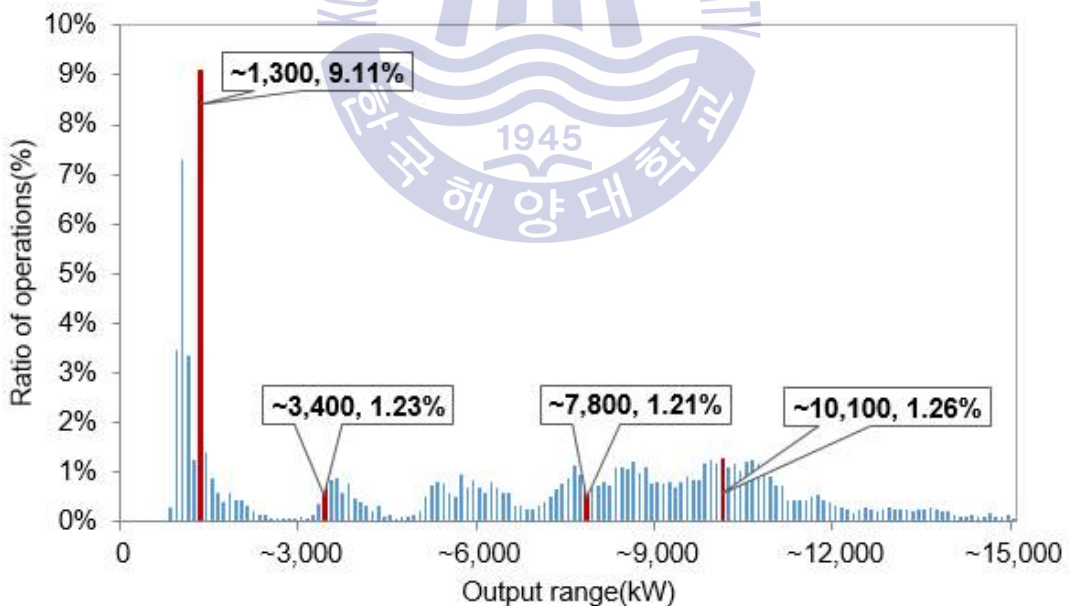


Fig. 17 Distribution of the total load at all state

Fig. 17은 선박의 모든 운용모드에서 전체 부하의 분포를 나타낸다. 가장 높은 빈도로 운용되는 부하 범위는 1,200~1,300 kW 범위로 선박 운용 기간 중 9%를 차지한다. 그 외 부하는 범위에 따라 증감을 반복하여 1.25 % 비율로 3,300~3,400 kW에서 운용, 1.21 % 비율로 7,700~7,800 kW에서 운용, 1.26 % 비율로 10,000~10,100 kW 범위에서 운용된다. 이 네 가지 부하범위에 대해서 발전기 용량을 설계하고 시뮬레이션을 통해 배터리 용량을 제안하여 평가하고자 한다.

3.3 부하분석에 의한 발전기-배터리 용량선정

3.3.1 기존 발전기 설계 방법

기존 발전기 용량 선정 방법은 크게 세 가지가 있다. 정상상태의 부하용량으로부터 발전기 용량 도출, 과도상태의 최대 전압강하로부터 발전기 용량 도출, 과도상태에서 단시간 과부하 내량(overload capacity)로부터 발전기 용량 도출 방법이 있다. 다음 식 (3)~(5)는 자가발전설비의 용량계산 방법을 나타낸다[12].

(1) 정상상태 부하용량 기반 발전기 용량 계산

$$PG_1 = P_L \times \frac{\alpha}{\eta_L \times PF} \quad (3)$$

여기서, PG_1 은 정상상태에서 전력공급에 필요한 용량[kVA], P_L 은 총 부하량[kVA], α 는 부하율[%], η_L 는 총 부하 종합효율[%], PF 은 총 부하역률[무차원수]를 의미한다.

(2) 과도상태의 최대 전압강하 기반 발전기 용량 계산

$$PG_2 = P_m \times \beta \times C \times X_d \times \frac{1 - \Delta V}{\Delta V} \quad (4)$$

여기서, PG_2 는 최대기동전력을 갖는 부하를 기동할 때 허용전압 강하를 고려한 용량[kVA], P_m 은 최대기동전력을 갖는 부하 출력[kW], β 는 부하의 유효전력에 대한 피상전력의 비[무차원수], C 는 부하 기동계수(직입기동의 경우 1, Y- Δ 기동의 경우 0.67)[무차원수], X_d 는 발전기 정수(일반적으로 0.25)[무차원수], ΔV 는 발전기 투입 시 허용전압 강하율[%]를 의미한다.

(3) 단시간 과부하 내량 기반 발전기 용량 계산

$$PG_3 = \frac{P_L - P_m}{\eta_L} + P_m \times \beta \times C \times PF_S \times \frac{1}{\cos \theta} \quad (5)$$

여기서, PG_3 은 기동출력과 입력출력의 차가 최대가 되는 부하 기동할 때 발전기 용량[kVA], P_L 은 총 부하량[kVA], P_m 은 최대기동전력을 갖는 부하 출력[kW], PF_S 는 최대기동전력을 갖는 부하 기동 시 역률(일반적으로 0.4)[무차원수], η_L 은 총 부하 종합효율[%], $\cos \theta$ 는 정격역률[무차원수]를 의미한다.

3.3.2 부하분석 기반 발전기 용량 선정 방법

앞서 동력 형태로 전달되는 추진부하를 전력 형태로 전달되는 추진부하로 변경하고, 운용모드별 부하분석을 통해 대상 선박의 부하 운용 특성을 분석하였다. 앞서 분석한 결과를 바탕으로 가상 선박에 대해 발전기 용량을 선정한다. 발전기 용량은 다음 조건을 만족하여 설계된다.

(1) 부하분석 기반 발전기 용량 선정 조건

- ① 발전기는 4대를 기준으로 한다.
- ② 발전기 1대는 중복성 확보 개념을 갖는다. 즉, 최대부하까지 발전기 3대로 운용이 가능해야 한다.

- ③ 최빈부하를 발전기 용량의 80 % 로 설정하여 발전기가 발전기 최적효율구간에서 자주 운용되도록 설계한다.
- ④ 발전기 용량은 1종(4대 동일 용량) 또는 2종(2대씩 동일 용량)으로 설계한다.

(2) 부하분석 기반 발전기 용량 선정 단계

이상의 조건을 바탕으로 하여 발전기 용량 선정을 아래의 순서로 수행한다.

- ① 최대부하 산정 : 추진부하와 보조부하를 통합한 전체부하 데이터에서 최대 부하를 계산하여, 정상상태의 시스템에서 발생 가능한 최대부하를 계산한다.
- ② 발전기 발전필요최소용량 계산 : 최대부하에 안전계수를 고려하여 발전기가 확보해야하는 최소 기준이 되는 발전필요최소용량을 계산한다. 이를 바탕으로 총발전기용량을 결정한다.
- ③ 발전기 운용 조합 선정 : 발전필요최소용량을 만족하는 각 발전기 용량의 조합을 도출한다. 부하분석을 통해 도출된 최빈부하가 발전기 용량의 80 %가 되어 발전기 최적효율구간에서 높은 비율로 운용되도록 각 발전기 용량과 조합 후보군을 선정한다.
- ④ 선박 부하 데이터를 이용한 배터리 용량 계산 : 도출된 발전기 조합 후보군에 총 55항차의 선박 부하 데이터를 입력하여 필요한 배터리 용량을 계산한다. 발전기가 최적효율구간에서 운전하기 위해서 배터리가 부담해야하는 충·방전 용량으로 계산된다.
- ⑤ 발전기 조합별 발전기-배터리 용량 평가 : 앞서 배터리 용량 계산 단계에서 도출된 각 발전기 조합별로 총 55항차에 대해 배터리가 부담해야하는 용량을 평가한다. 필요한 배터리 용량이 작고 항차별 요구되는 배터리 용량의 분산이 작으면, 발전기의 최적효율구간 근처에서 운전하는 빈도가 높고 부하의 변동이 적어 배터리가 부담해야하는 부하가 적다는 의미를 갖는다.

부하분석 기반 발전기 용량 선정은 발전기와 배터리를 최적 용량으로 설계하고 부하제어 알고리즘을 적용하기 위한 것으로 기존 발전기 설계 방법 중 정상상태 부하용량으로부터 발전기 용량 계산 방법에 포함된다. 시스템의 요구사항에 따라서 과도상태의 최대 전압강하 기반의 용량 계산 또는 단시간 과부하 내량 기반 발전기 용량 계산이 추가로 필요하다.

3.3.3 부하분석 기반 발전기 용량 선정 방법

발전기 운용 조합을 도출하기 위해서 최대부하 계산, 발전필요최소용량 계산을 수행하고, 앞서 분석한 최빈부하운용구간을 적용하여 발전기 용량 구성을 몇 가지 후보 케이스로 도출한다.

(1) 최대부하 산정

최대부하는 추진부하와 보조부하를 합한 전체부하 중 최대부하로 산정한다. 전력부하로 변환된 추진부하와 기존 기계식 추진시스템에서 전력부하를 보조부하로 하여 시간에 따른 전체부하를 계산하여, 최댓값을 찾는다.

$$P_{total,peak} = \max(P_{el,ij} + P_{p,ij}) \quad (6)$$

여기에서 $P_{total,peak}$ 는 최대부하[kW], $P_{el,ij}$ 는 i 항차 j 번째 보조부하[kW], $P_{p,ij}$ 는 i 항차 j 번째 추진부하[kW]이다. 수집한 부하 데이터로부터 $P_{total,peak} = 20,135$ kW로 계산된다.

(2) 발전기 발전필요최소용량 계산

발전 용량 설계에서 안전계수를 고려하여 발전시스템의 발전필요최소용량을 식 (6)과 같이 설계한다. 배터리사용을 할 수 없는 상황을 고려하여 발전시스템의 발전필요최소용량은 발전기 운전만으로 선박 내 부하에 전력을 공급할 수 있는 용량으로 설계하였다.

$$P_{\min} = k \cdot P_{total, peak} \quad (6)$$

여기서, P_{\min} 은 요구되는 발전량의 최소기준인 발전필요최소용량 [kW], k 는 안전계수[무차원수]로 1.2가 적용되었다. 이를 계산하면 발전필요최소용량은 24,162 kW 이상을 만족해야한다.

(3) 발전기 운용 조합 선정

발전기가 최적부하에서 운용하는 빈도를 높이기 위해서 앞서 부하분석한 내용을 기반으로 발전기 운용 조합을 설계한다. 설계된 최대 발전필요최소용량을 만족하면서 최빈부하 범위에서 발전기 최적 운용상태(발전기 용량의 80%)가 유지되도록 설계하였다. 발전기 운용 조합을 도출하기 위한 조건은 다음과 같다.

- ① 발전기 3대 운용 시, 안전계수를 적용한 발전필요최소용량을 만족해야 한다.
- ② 발전기는 최빈부하 범위에서 80 % 부하율로 운전되어야 한다.

앞서 부하분석에서 도출한 최빈부하는 $p_1 \sim p_4$ 다음의 4구간으로 정하여 조합에 따른 가능한 부하를 설정한다.

$$p_1 = 1,300 kW$$

$$p_2 = 3,400 kW$$

$$p_3 = 7,800 kW$$

$$p_4 = 10,100 kW$$

최빈부하($p_1 \sim p_4$)의 배수로 발전기를 3대 운용하다고 가정할 때, 다음 Table 8과 같은 출력 조합이 가능하다.

Table 8 Reference case of generator load

조합	구성	80% 부하 [kW]
1	$3p_1$	3,750
2	$3p_2$	10,050
3	$3p_3$	23,250
4	$3p_4$	33,150
5	$p_1 + 2p_2$	7,950
6	$p_1 + 2p_3$	16,750
7	$p_1 + 2p_4$	23,350
8	$p_2 + 2p_1$	5,850
9	$p_2 + 2p_3$	18,850
10	$p_2 + 2p_4$	25,450
11	$p_3 + 2p_1$	10,250
12	$p_3 + 2p_2$	14,450
13	$p_3 + 2p_4$	29,850

Table 8의 출력조합이 80% 부하임을 고려하여 발전필요최소용량 P_{\min} 를 만족하는 발전기 용량케이스를 선정한다. Table 8의 3, 4, 7, 10, 13 조합과 발전필요최소용량 P_{\min} 를 발전기 3대 운전으로 만족하는 동일용량 조합을 대조군으로 8,000 kW 발전기 4대 조합을 추가하여 총 6가지 조합으로 다음 Table 9와 같이 6가지 발전기 용량 케이스를 선정하였다.

Table 9 Selected generators capacity combinations

조합	구성	GEN1 (80%load) [kW]	GEN2 (80%load) [kW]	GEN3 (80%load) [kW]	GEN4 (80%load) [kW]	총합 [kW]
1	P_{min}	8,375 (6,700)	8,375 (6,700)	8,375 (6,700)	8,375 (6,700)	33,500 (26,800)
2	$4p_3$	9,750 (7,800)	9,750 (7,800)	9,750 (7,800)	9,750 (7,800)	39,000 (31,200)
3	$4p_4$	12,625 (10,100)	12,625 (10,100)	12,625 (10,100)	12,625 (10,100)	50,500 (40,400)
4	$2p_1 + 2p_4$	1,625 (1,300)	1,625 (1,300)	12,625 (10,100)	12,625 (10,100)	30,750 (24,600)
5	$2p_2 + 2p_4$	4,250 (3,400)	4,250 (3,400)	12,625 (10,100)	12,625 (10,100)	36,000 (28,800)
6	$2p_3 + 2p_4$	9,750 (7,800)	9,750 (7,800)	12,625 (10,100)	12,625 (10,100)	47,000 (37,600)

3대 발전기 용량의 총합이 P_{min} 이 되는 조합 1을 비교군으로 하여, 최빈부하를 기준으로 설계한 발전기 용량 조합과 배터리를 비교한다.

(4) 선박 부하 데이터를 이용한 배터리 용량 계산

부하제어 알고리즘은 발전기의 최적운용을 위해 발전기-배터리 간의 부하분배를 수행한다. 발전기 조합에 대해서 발전기의 최적부하 운용을 가정하여 요구배터리용량을 계산하고, 이를 바탕으로 각 조합을 평가한다. 요구배터리용량은 6,800 TEU 컨테이너 부하 데이터의 55항차에 대해서 시뮬레이션을 수행하여 그 경향을 통해 발전기 용량 조합과 배터리 용량을 선정한다. 입력된 발전기 용량으로 식 (7)와 같이 발전기의 최적부하 운용점을 도출한다.

$$P_{op} = \{op_1, op_2, \dots, op_n\} \quad (7)$$

여기서, P_{op} 은 시스템의 최적부하 운용점[kW], op_1, op_2, \dots, op_n 는 발전기 운용 조합에 따른 최적부하 운용점[kW]을 의미한다. 다음 Table 10은 발전기 용량 조합 4에 대해서 최적부하 운용점을 도출한 결과의 예시이다.

Table 10 Optimal load operation by generator combination case

발전기용량[kW]		발전기운용조합[kW]		80% 최적부하운용점 [kW]
GEN1	1,625	GEN1 / GEN2	1,625	1,300
GEN2	1,625	GEN1+GEN2	3,250	2,600
GEN3	12,625	GEN3	12,625	10,100
GEN4	12,625	GEN3+GEN4	25,250	20,200
		GEN1+GEN2+GEN3 / GEN1+GEN2+GEN4	15,875	12,700
		GEN1+GEN3+GEN4 / GEN2+GEN3+GEN4	26,875	21,500

최적부하 운용점을 기준으로 부하와 떨어진 거리를 이용하여 발전기 최적부하 운용을 위해 배터리가 부담해야 할 필요 용량과 충방전 경향을 식 (8)~(10)을 통하여 도출한다.

$$B_{diff} = \{b_{p1}, b_{p2}, \dots, b_{pn}\} \quad (8)$$

$$b_{p1} = |p_1 - P_{tl}|, b_{p2} = |p_2 - P_{tl}|, \dots, b_{pn} = |p_n - P_{tl}| \quad (9)$$

$$B_{diff, \max} = \max(B_{diff}), B_{diff, \min} = \min(B_{diff}), B_{diff, \text{avg}} = \text{average}(B_{diff}) \quad (10)$$

여기서, B_{diff} 는 시간에 따른 배터리 부담 전력[kW], P_{tl} 은 시간에 따른 부하[kW], $B_{diff, \max}$, $B_{diff, \text{avg}}$, $B_{diff, \min}$ 은 각 B_{diff} 의 최댓값[kW], 평균값[kW], 최소값[kW]을 의미한다. B_{diff} 는 최적발전부하 운용점 p_1, p_2, \dots, p_n 과 시간에 따른 부하 P_{tl} 의 차이인 $b_{p1}, b_{p2}, b_{p3}, b_{p4}$ 으로 구할 수 있다.

Fig. 18은 6가지 조합에 대해서 항차별로 배터리 충·방전 경향을 도출한 그래프이다. 총 55항차에 대해서 수행하였으며, Fig. 18은 결과 예시로 항차 7, 8, 15, 19에 대한 조합 별 요구 충·방전 경향을 나타낸다.

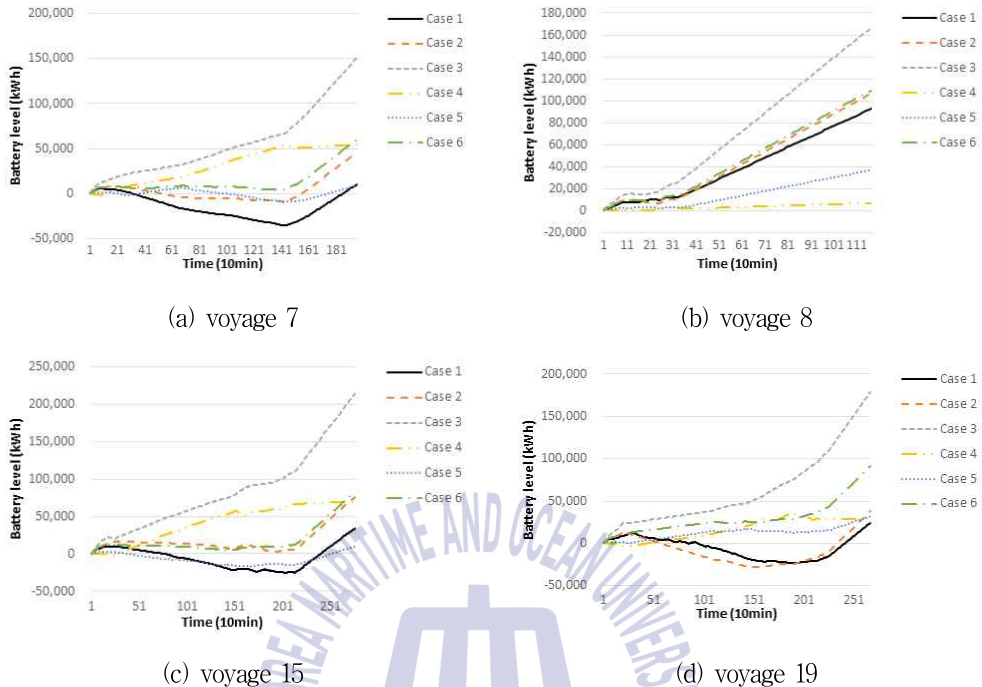


Fig. 18 Charging and discharging trend by generator combination case

Fig. 18을 통해 발전기 조합에 따라 발전기 최적부하 운용을 위해서 요구되는 배터리 용량을 확인할 수 있다. 그래프의 배터리 용량이 양수일 경우 충전되는 전력량을 의미하고, 음수일 경우는 방전되는 전력량을 의미한다.

Fig. 18의 (a) voyage 7을 살펴보면 첫 번째 조합으로 발전기를 운용할 경우, 최적부하 운용을 위해서 1,410분까지 방전 후, 그 이후에는 충전을 하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 18에서 확인되는 최댓값이 요구되는 배터리 용량이 된다. (b) voyage 8에서는 네 번째 조합으로 발전기를 운용할 경우, 가장 작은 배터리 용량을 필요로 하며, 세 번째 조합으로 발전기를 운용할 경우, 가장 큰 배터리 용량을 필요로 하게 된다. (c)의 voyage 15와 (d) voyage 19에서는 다섯 번째 조합으로 발전기를 운용할 경우, 가장 작은 배터리 용량을 필요로 하며, 세 번째 조합으로 발전기를 운용할 경우, 가장 큰 배터리 용량을 필요로 하게 된다.

(5) 발전기 조합별 발전기-배터리 용량 평가

모든 항차에 대한 발전기 조합별 배터리 용량 설계 결과로부터 필요 용량의 평균값, 최댓값, 최솟값을 구하여 데이터의 중심과 산포를 확인하기 위해 상자그림(box plot)으로 나타내었다. 다음 Fig. 19~20는 발전기 조합별 배터리 요구 용량에 대한 상자 그림이다.

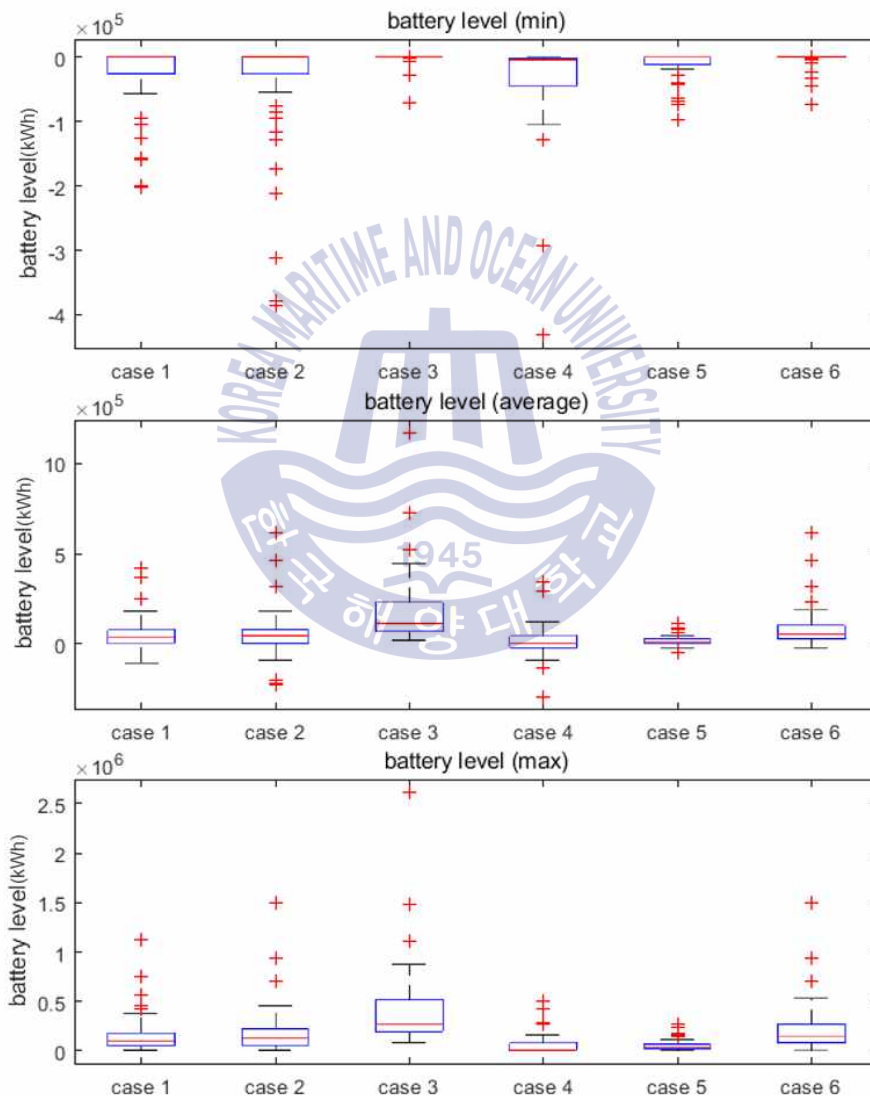


Fig. 19 Battery capacity by generator combination case(1)

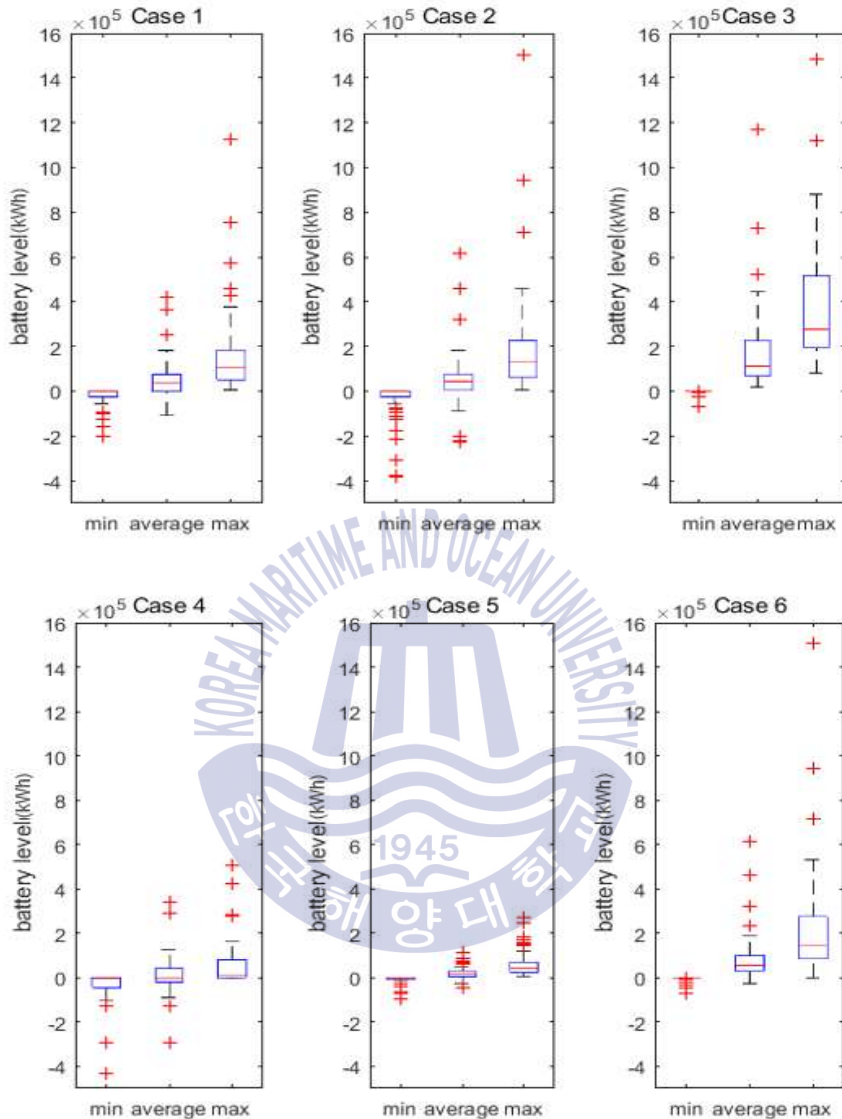


Fig. 20 Battery capacity by generator combination case(2)

Fig. 19의 첫 번째 그래프는 배터리 최솟값에 대한 발전기 용량 조합별 상자그림이다. Case 3(Table 9의 조합 3)과 Case 6(Table 9의 조합 6)에서 데이터의 상위 25%인 제 1 사분위수와 하위 25%인 제3 사분위수를 포함하는 상자크기가 작은 것을 확인할 수 있다. 그 중 발전기 용량 Case 3이 +로

표시된 이상치가 사분위 상자에 근접하여 항차별 최솟값 차이가 가장 작은 것을 확인할 수 있다. Fig. 19의 두 번째 그래프는 배터리 평균값에 대한 발전기 용량 조합별 상자그림이다. Fig. 19의 두 번째 그래프에서 Case 5(Table 9의 조합 5)의 경우가 상자크기가 가장 작고, 이상치가 상자와 가깝게 위치하여 항차별 평균값 차이가 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 반면 평균 용량의 평균값은 Case 4(Table 9의 조합 4)에서 보다 작게 나타난다. Fig. 19의 세 번째 그래프는 배터리 최댓값에 대한 발전기 용량 조합별 상자그림이다. Case 5에서 상자크기가 가장 작고, 이상치가 상자와 가깝게 위치하여 항차별 평균값 차이가 가장 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 20은 Fig. 18와 같은 결과 그래프를 발전기 용량 조합별로 구분하였다. 발전기 용량 조합별 배터리 요구 용량 분포를 살펴보면 Case 5에서 이상치도 사분위수 범위에 근접한 것을 알 수 있다. 다음 Table 11은 발전기 용량 조합에 대한 최소, 평균, 최댓값의 1분위수, 2분위수(중앙값), 3분위수를 정리하였다.

Table 11 Battery capacity by generator combination case(3)

발전기 용량 조합 별 구분		1분위수[kWh]	2분위수(중앙값)[kWh]	3분위수[kWh]
조합 1 (Case 1)	최솟값	-20,839	5,633	58,274
	평균값	858	40,151	10,476
	최댓값	888	75,951	18,507
조합 2 (Case 2)	최솟값	-16,902	8,169	64,366
	평균값	1,042	44,614	129,140
	최댓값	1,068	78,042	225,490
조합 3 (Case 3)	최솟값	1,581	71,891	202,710
	평균값	1,594	112,970	276,480
	최댓값	1,612	228,660	517,700
조합 4 (Case 4)	최솟값	-37,403	-13,851	1,441
	평균값	-3,468	487	7,807
	최댓값	-902	4,099	8,078
조합 5 (Case 5)	최솟값	-9,803	4,863	25,165
	평균값	316	14,868	44,087
	최댓값	338	26,760	70,984
조합 6 (Case 6)	최솟값	1,041	30,305	86,284
	평균값	1,057	54,491	140,830
	최댓값	1,079	101,300	274,170

시뮬레이션 결과 Case 5에서 발전기가 최적 운용부하에서 요구되는 배터리 용량이 작았으며, 유의값 또한 작게 나타났다. 이는 Case 5의 발전기 조합을 적용할 시 발전시스템이 높은 효율로 운용될 수 있으며 배터리 용량 또한 작게 설계할 수 있음을 의미한다. 배터리 용량은 Case 5의 결과로부터 평균값에 안전계수를 고려하여 식 (11)과 같이 계산하였다.

$$C_{battery} = k \cdot B_{avg} \quad (11)$$

여기서 $C_{battery}$ 는 가상선박의 배터리 용량 [kWh], k 는 안전계수(=1.1) [무차원수], B_{avg} 는 항차별 시뮬레이션 결과 요구되는 배터리 용량의 평균값의 3분위수 [kWh]를 의미한다.

3.4. 가상선박의 전기추진시스템 용량 선정

본 연구에서는 발전기 및 배터리로 구성된 전기추진시스템이 설치된 6,800 TEU 컨테이너선을 가상선박으로 선정하여 부하제어 알고리즘에 대한 검증을 수행한다. Table 12는 가상선박의 발전기 및 배터리 용량을 나타낸다. 발전기 용량 선정이 부하분석을 기반으로 수행되어 유효전력의 단위인 kW 로 산출되었다.

Table 12 Generators and battery system capacity of virtual container ship

발전기 및 배터리	용량	용량 (0.8역률)
1번 발전기(Generator 1)	4,250 kW	5,313 kVA
2번 발전기(Generator 2)	4,250 kW	5,313 kVA
3번 발전기(Generator 3)	12,625 kW	15,781 kVA
4번 발전기(Generator 4)	12,625 kW	15,781 kVA
배터리	48,500 kWh	-

본 장에서는 441일 측정된 데이터, 총 55항차에 대해서 발전기 부하율 80%를 유지하기 위한 배터리 충·방전 용량을 시뮬레이션 하였다. 본 연구에서는 용량 시뮬레이션 결과를 기준으로 배터리의 요구 운용 범위를 계산하고 다음 5장에서 부하제어 알고리즘 시뮬레이션에 적용한다.



제 4 장 부하제어시스템의 부하제어 알고리즘

에너지관리시스템은 ERFCS, CPCS, HVACS 및 부하제어시스템을 통합 모니터링 및 제어 관리하여 선박 내 에너지 효율성을 높이는 시스템이다. 에너지관리시스템이 전기추진시스템에 적용되면, 제어하는 부하 범위가 넓어지고 발전원과 부하군이 다양해지기 때문에 기존 기계식 추진시스템에서보다 확장된 역할을 담당해야 한다. 특히 부하제어 알고리즘은 추진부하와 배터리를 포함한 전력시스템에 대해서 효율적인 부하분배를 통해 최적발전부하 운용이 가능해야 한다. 다음 Fig. 21은 부하제어시스템과 에너지관리시스템의 구성을 나타낸다.

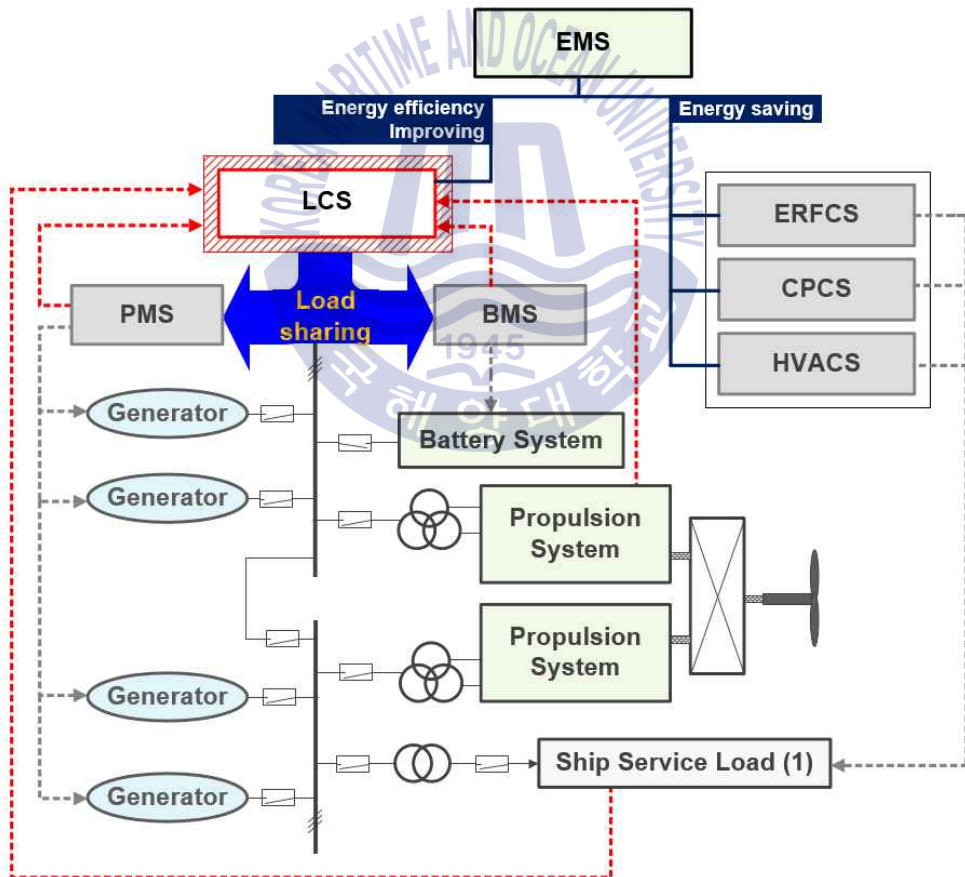


Fig. 21 Configuration of LCS and EMS

에너지관리시스템의 세부 알고리즘은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 각 시스템에 대해서 에너지를 절감하기 위한 알고리즘과, 에너지의 발전과 사용에 효율성을 높이는 알고리즘으로 에너지 효율성 알고리즘은 발전 효율을 높이고, 발전시스템과 에너지 저장 시스템간의 적절한 부하 분배를 통해 결과적으로 에너지를 절감하는 알고리즘이다. 다음 Table 13은 각 시스템에 대한 설명을 나타내고 있다.

Table 13 System configuration of virtual ship

시스템	목적	역할
LCS	부하 분배를 통한 에너지 효율성 증대	발전기 부하율, 추진부하, 배터리 SOC를 모니터링하여 PMS와 BMS 사이의 부하분배를 수행
ERFCS	에너지 절감	기관실 온도 및 공기의 질을 유지하기 위해 팬 속도를 제어하여 전력 소모량을 줄이는 시스템
CPCS	에너지 절감	외부 환경에 따라 청수 펌프 시스템을 제어하여 전력 소모량을 줄이는 시스템
HVACS	에너지 절감	선박의 냉·난방 시 외기, 내기 온도를 비교하여 팬, 댐프 시스템의 제어를 통해 전력 소모량을 줄이는 시스템
EMS	시스템 통합	선박의 에너지 상태에 따라 LCS, ERFCS, CPCS, HVACS를 통합 모니터링 및 제어하는 시스템
PMS	전력 관리	선박의 전력계통을 제어 및 감시하는 시스템으로 발전기의 운전 및 정지, 발전기 병렬운전, 중부하 운전에 따른 발전기 제어 등을 수행
BMS	배터리 관리	배터리 상태를 모니터링하여 배터리의 충·방전 시 과충전 및 과방전을 방지하여 배터리의 효율 증대와 수명저하 방지, 셀 밸런싱 등을 수행

4.1 부하제어 알고리즘의 목표

기존 에너지관리시스템은 기계식 추진시스템을 대상으로 적용되었으며, 중부하 및 ERFCS, CPCS, HVACS 등의 모니터링 및 통합관리 등을 수행했다. 에너지관리시스템이 전기추진시스템에 적용되면, 발전기가 부담해야 하는

전력범위가 넓어지면서 부하제어시스템의 부하분배기능이 중요해진다. 기존 기계식 추진시스템에 적용하는 에너지관리시스템의 부하제어시스템은 주요 기능으로 ① 배터리와 연계한 발전기 최적발전부하 운용, ② 선박 운용모드에 따른 중부하 관리, ③ 부하 모니터링을 통한 부하 우선순위 제어 기능을 갖는다. 전기추진시스템으로 넘어오면서 선박의 추진부하가 전력부하로 포함되게 되고, 따라서 선박의 운용모드 구분 단계에서 전력 부하 특징에 따른 분류가 필요해진다. 추진부하가 포함된 부하분석과 발전기 운용 대수, 발전기 부하율, 배터리 SOC, 상용부하, 중부하, 비중요부하 등의 부하 간의 비율 등을 고려할 필요가 있다. 부하제어 알고리즘은 선박 운용모드에 따른 부하제어를 목표로 다음의 단계로 수행된다.

(1) 운용모드 탐색

선박의 운용모드를 탐색한다. 전체 부하의 70% 이상을 차지하는 추진부하가 전력부하로 포함되면서, 추진부하의 특성이 부하의 구분에 큰 영향을 미친다. 운용에 따라 전력부하의 특성을 분석하고 모드를 구성하여 실제 부하 데이터를 수집하여 운용 모드를 판별할 수 있도록 한다. 추진시스템의 전력부하, 보조시스템의 전력부하와 선속을 수집하고, 전체부하와 추진부하-보조부하간의 비율 등을 통해 운용모드를 결정한다.

(2) 운용모드별 부하분배

탐색한 운용모드에 따라 요구 부하를 결정한다. 추진부하가 큰 영향을 미치는 모드에서는 선박의 주변 환경 및 선속 명령이 전체 부하에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이 경우, 운용모드별 부하분배 단계에서는 보다 큰 여유율을 갖도록 여유 전력을 설정한다.

(3) 에너지 계수 측정

부하제어 알고리즘이 전기추진시스템에 적용되면서 고려해야 할 변수들이 많아진다. 발전기의 부하율과 발전기 여유율, 배터리의 용량 및 충방전 상태, 추진부하 및 보조부하를 바탕으로 발전기 시스템이 전체 전력시스템의 어느 정도의 부하를 분담해야 하는지, 배터리시스템이 전력을 충전하여 발전기 부하율을 높여야 하는지 또는 방전하여 발전기 부하율을 낮추어야 하는지

결정해야 한다. 알고리즘을 보다 간단하게 구성하기 위해서 판단할 수 있는 계수로 에너지유연성(energy flexibility)과 에너지효율성(energy efficiency)을 선정하여 활용하였다.

(4) 부하제어 알고리즘

이상의 운용모드별 부하분배와, 에너지 계수 측정을 통해 전력관리시스템이 분담하는 부하와 배터리관리시스템이 분담하는 부하를 제어하는 알고리즘을 수행한다.

4.2 모드탐색과 모드별 특징

선박의 운용모드를 탐색하기 위해서 모드별 특징을 추출한다. 선박의 실측데이터로부터 데이터 마이닝의 군집분석을 활용하여 데이터를 분류하고, 특징을 추출하여 모드를 선정하였다.

4.2.1 데이터 마이닝과 군집분석

데이터 마이닝(data mining)은 데이터를 대상으로 통계적 규칙이나 패턴을 찾아내는 방법을 의미한다. 데이터 마이닝 기법 중 인공신경망(artificial neural network)을 기반으로 하는 방식으로는 자기조직화지도(Self Organizing Map, SOM), 신경망, 전문가 시스템 등이 있다. 데이터 마이닝은 Fig. 22 및 다음과 같은 목적으로 활용이 된다[13].

- ① 분류(classification) : 데이터를 정의된 특성으로 분류한다.
- ② 군집화(clustering) : 다양한 특성을 갖는 데이터에 대해서 유사한 특징을 가진 데이터를 군집으로 만들어 분류한다. 분류와 차이점으로 군집화의 경우 특성을 정의하지 않는다.
- ③ 연관성 분석(association analysis) : 데이터에 존재하는 관계를 찾아낸다.
- ④ 연속성 분석(sequencing analysis) : 특정 기간을 갖는 데이터에 대해서 관계를 찾아낸다.
- ⑤ 예측(forecasting) : 데이터의 패턴을 바탕으로 하여 다음 데이터를 예측한다.

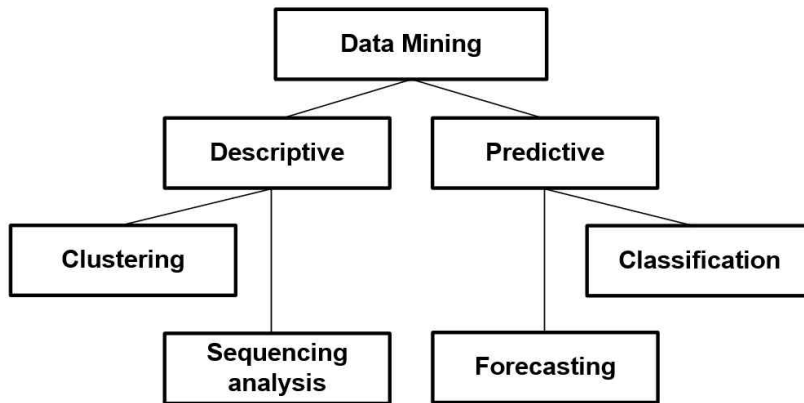


Fig. 22 Classification of data mining techniques

이 중 군집분석(cluster analysis)은 다변량 데이터를 특성에 따라 군집화하여 특성을 파악할 수 있다. 군집의 개수가 결정되지 않았거나, 특성을 알 수 없는 초기 데이터에 대해서 군집화를 통해 데이터간의 유사성 정도를 판단하면 데이터 분포와 구조 이해의 목적으로 활용이 가능하다. 분류와 비교하였을 때 군집화의 장점으로 군집의 특성과 개수가 파악되지 상태에서 사용할 수 있다는 점이다. 따라서 데이터 분석 초기단계에서 사용하여 데이터 간의 유의성 판단, 구조 이해의 목적으로 활용이 된다.

본 연구에서는 군집분석을 통해 선박에서 측정한 데이터간의 관계를 군집화하여 수집한 전력데이터와 선박 운용 모드와의 유의성을 판단하고, 그 결과를 부하제어 알고리즘에서 사용할 데이터 변수 선정에 활용한다.

4.2.3 자기조직화지도를 이용한 실시간 부하 데이터 클러스터링

자기조직화지도는 1980년대 핀란드의 공학자 코호넨(Teuvo Kohonen)에 의해 개발된 인공신경망의 일종으로 비지도학습(unsupervised learning)에 의한 클러스터링 방법 중 하나이다[14]. 자기조직화지도의 가장 큰 특징은 시각화(visualization)와 축약화(abstraction)로, 별도의 피드백이나 지도 없이 자체적으로 학습을 진행하여 경쟁학습을 통해 고차원의 데이터를 저차원

(일반적으로 2차원)의 지도에 변환시켜 나타낼 수 있다는 점이다. 자기조직화 지도는 경쟁학습을 통해 활성화시킬 출력 노드를 선택하는 과정에서 노드를 서로 경쟁시켜 하나의 출력 뉴런을 선택한다. 이때 선택된 뉴런을 승자 뉴런이라고 하며, 입력벡터와 거리 값이 최소인 노드를 선택하고, 선택된 노드와 주변 노드에 대해서 가중치를 수정해가면서 학습이 진행된다. 일련의 과정을 벡터값의 변화가 거의 없거나 지정한 학습 횟수에 도달할 때까지 반복하여 수행한다. 다음 Fig. 23은 자기조직화지도의 학습 개념을 설명한다.

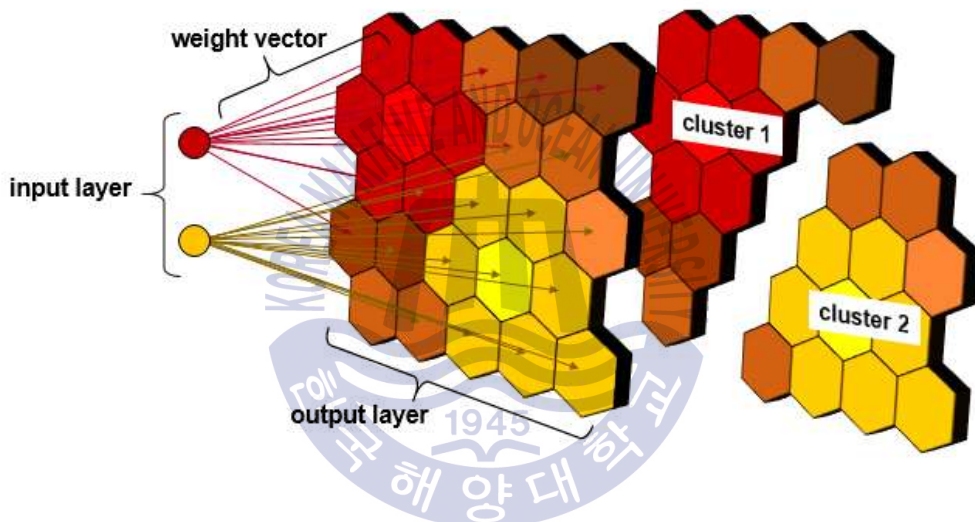


Fig. 23 Concept of low dimensional map transformation of SOM

자기조직화지도는 입력층(input layer)과 경쟁층(competition layer), 그리고 최종 출력층(output layer)으로 나뉘어진다. 입력층은 표본 데이터로부터 얻어진 다차원 데이터로 n 개의 p 차원 입력개체(input unit)로 구성된다. 각 입력개체에는 가중치 벡터(weight vector)가 초기화과정을 거쳐 임의값으로 입력된다. 가중치 벡터의 초기화 방법은 선형 초기화(linear initialization)와 무작위 초기화(random initialization)가 있다. 다음 Table 14는 자기조직화지도의 수행절차에 대해서 정리하였다.

Table 14 Step for performing SOM

단계	수행 내용
1단계	시간 t 는 1로 초기화한다. m 개의 p 차원 가중치(weight)는 초기화 방법을 통해 초기화한다.
2단계	<p>입력값이 도출되면, 입력값이 갖는 m개의 가중치 중 가장 가까운 것을 찾아내고, 그 가중치가 속한 노드를 $k(i)$라고 할 때, 유클리드 거리를 사용하여 승자노드 k를 구한다. 유클리드 거리는 다음으로 표현된다.</p> $\ x_i - w_{k(i)}\ \leq \ x_i - w_j\ , \quad j = 1, \dots, m$ <p>여기서 x_i는 입력값, $w_{k(i)}$는 노드 $k(i)$의 가중치를 의미한다.</p>
3단계	<p>유클리드 거리가 가장 작은 승자노드 $k(i)$와 그 주변 노드의 가중치를 다음으로 업데이트 한다.</p> $w_j \leftarrow w_j + \alpha_t \cdot h_t(k(i), j) * (x_i - w_j), \quad \ r_j - r_{k(i)}\ \leq d_t$ <p>여기서 노드 r_i는 노드 j의 그리드 위치점이고, 학습률(learning rate) α_t는 초기값 α_0에서 최종값 α_1까지 t에 따라 감소하도록 세팅된다. $h_t(k, j)$는 국소가중치(local weight)로서, 승자노드의 주변 값에 작은 가중치를 적용하기 위함으로 사용된다. t와 $\ r_j - r_k\$에 따라 감소하도록 세팅되는데 흔히 다음 패턴의 함수가 적용된다.</p> $h_t(k, j) = \exp - \ r_j - r_k\ ^2 / (2\sigma_t^2) \quad (\sigma_t^2 \text{는 } t \text{에 따라 감소})$ <p>마지막으로 d_t도 t에 따라 감소하는 계단함수이다.</p>
4단계	<p>한 개체가 단계 2와 3에 따라 처리되면 시점 t를 1만큼 증가시킨다. 마지막 값이 처리되면 첫 입력값으로 되돌아간다. 단, 모든 중량값의 변화가 거의 줄어들어 포화된 상태거나, 시점 t가 미리 지정된 최대 한계에 도달하게 되면 진행을 멈추고 각 개체의 승자노드 $k(1), \dots, k(n)$ 및 중량 w_1, \dots, w_m을 출력한다.</p>

4.2.3 부하 데이터 군집화를 통한 부하 모드 선정

(1) 최적노드수 선정

자기조직화지도를 수행하기 위해서는 데이터 개수에 적합한 노드수를 입력해야한다. 본 연구에서는 데이터의 개수에 따라 격자개수를 선정하였으며, 데이터 개수에 따라 비대칭 격자 구성을 활용하였다. 격자 개수는 다음 식 (12)로 구할 수 있다[16].

$$M \approx 5\sqrt{N} \quad (12)$$

여기서, M 은 격자 개수[개], N 은 대상의 관측 데이터 개수[개]를 의미하며, 이에 따라서 다음 Table 15와 같이 데이터 개수에 대해서 격자 개수를 선정한다.

Table 15 Selection of grid according to voyage case

항차	데이터갯수	격자 선정	항차	데이터갯수	격자 선정
1	1017	10×16	29	943	11×14
2	339	9×10	30	1598	10×20
3	697	11×12	31	139	6×10
4	552	9×13	32	629	9×14
5	88	6×8	33	1243	11×16
6	423	8×13	34	625	9×14
7	264	9×9	35	531	9×13
8	196	7×10	36	247	6×13
9	117	6×9	37	179	6×11
10	652	9×14	38	600	11×11
11	118	6×9	39	387	7×14
12	135	7×9	40	276	7×12
13	645	9×14	41	255	8×10
14	674	10×13	42	83	5×9
15	276	7×12	43	664	10×13
16	78	5×9	44	177	6×11
17	81	5×9	45	83	5×9
18	123	7×8	46	145	6×10
19	267	9×9	47	335	7×13
20	973	12×13	48	293	6×14
21	175	6×11	49	973	12×13
22	1582	11×18	50	197	7×10
23	623	9×14	51	1417	10×19
24	1884	12×18	52	132	7×8
25	601	11×11	53	240	7×11
26	397	9×11	54	758	10×14
27	392	9×11	55	1342	13×14
28	518	8×14			

(2) 55 항차에 대한 자기조직화지도 수행 결과

총 55항차에 대해서 자기조직화지도를 수행하였다. 군집화에 사용한 데이터는 보조부하, 추진부하, 전체부하, 보조부하 비율, 추진부하 비율, 선속이다. 군집화를 통해서 항차별 부하의 특징을 도출하고, 부하제어 알고리즘에 활용한다. Fig. 24는 항차 1에 대한 자기조직화지도 수행 결과를 나타낸다. 그 외 항차에 대해서는 부록 1에 정리하였다.

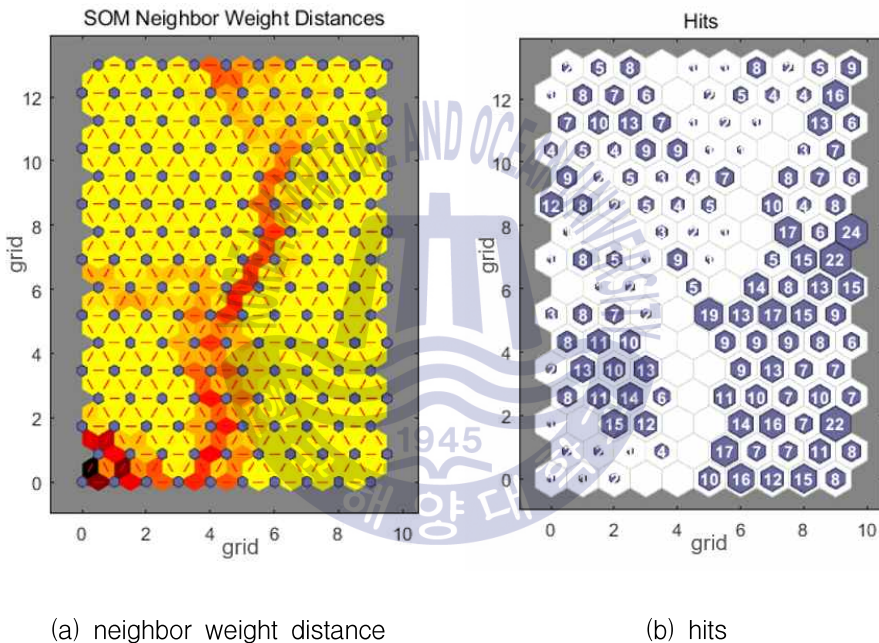


Fig. 24 Results of SOM of voyage 1

Fig. 24의 (a)는 격자간의 거리를 나타내며, 황색에서 적색을 거쳐 흑색으로 갈수록 군집간의 거리가 멀다는 의미를 갖는다. Fig. 24의 (b)는 격자에 위치한 데이터 개수를 의미한다. 항차 1은 크게 3개의 군집으로 나누어질 수 있다. 선박의 운용모드와 비교하면 좌측 상단이 정박 상태, 좌측 하단이 입출항상태, 우측이 항해 상태로 분류될 수 있다.

(3) 자기조직화지도 결과 분석

55항차에 대한 자기조직화지도 결과에 대해서 각 클러스터 별로 가장 많은 데이터를 가진 격자의 특징을 추출하여 선박 운용 특성을 분석하였다. 클러스터의 특성과 빈도를 고려하고자 각 항차별로 10개 격자를 대상으로 총 550개의 격자에서 보조부하, 추진부하, 전체부하, 보조부하비, 추진부하비, 선속 데이터를 추출하였다. 다음 보조부하, 추진부하, 전체부하, 보조부하비, 추진부하비, 선속 클러스터 데이터간의 상관관계를 보다 쉽게 확인하기 위해서 전체부하를 기준으로 데이터를 오름차순 정렬하여 데이터간의 상관관계를 확인하였다. 다음 Fig. 25는 전체 부하의 변화에 따른 보조부하와 추진부하의 크기 및 비율을 나타내고, Fig. 26는 전체 부하의 변화에 따른 선속과 보조부하 및 추진부하의 크기를 나타낸다.

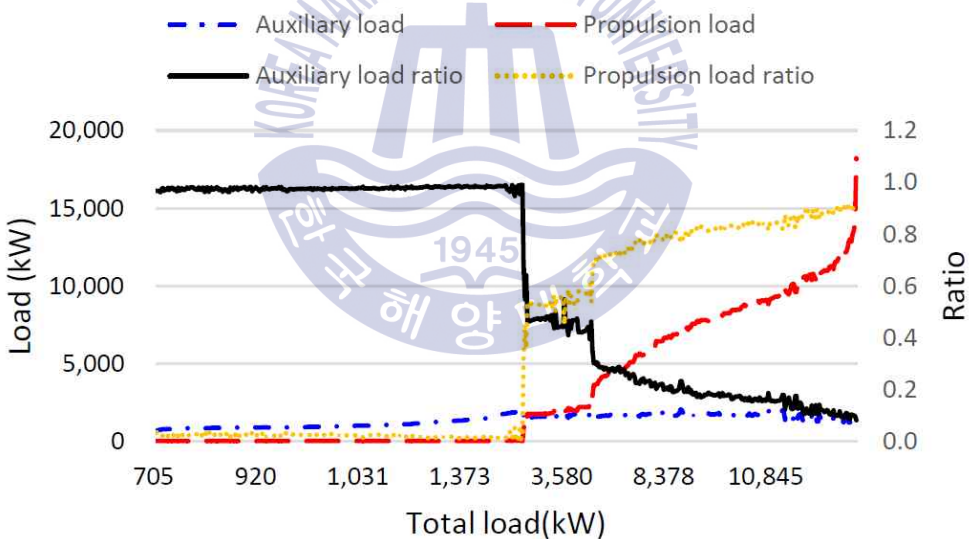


Fig. 25 Load and load ratio due to changes in total load

보조부하의 경우 추진부하와 비교하여 전체부하에 따른 변동이 작은 것으로 확인된다. 반면 추진부하는 전체부하가 증가하면 큰 폭으로 증가하게 되며, 따라서 전체 부하가 큰 구간에서는 추진부하가 높은 비율을 차지하게 된다.

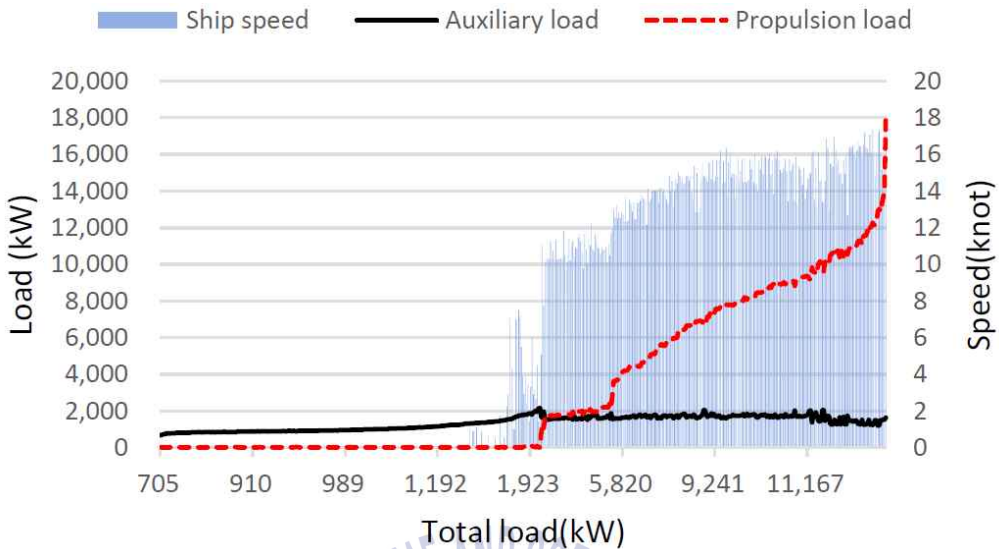


Fig. 26 Load and ship speed due to changes in total load

전체부하가 작은 구간에서는 선속도 느리게 나타난다. 선속이 0 일 때는 선박의 운용 모드로는 정박 상태라고 판단이 가능하며, 추진부하가 거의 존재하지 않는 상태로 보조부하가 전체부하의 98 % 이상을 차지하고 있다. 선속이 발생하면서 추진부하가 없는 구간은 관성에 의해 선속이 유지되었거나 마우스러스터에 의한 선속이 발생한 상태로 판단할 수 있으며, 보조부하가 증가하는 추세를 보인다. 이후 추진부하가 발생한 구간에서 보조부하는 다시 감소하며 이후 거의 일정한 부하를 유지한다. 추진부하는 선속이 증가함에 따라 함께 증가하는 추세를 보이나 같은 추진부하에서도 선속의 변화가 큰 편이다. 이는 해상상태와 타(rudder)의 사용에 따라 달라지는 것으로 판단된다.

Fig. 27과 Fig. 28은 각각 보조부하율의 변화에 따른 전력 변화와 추진부하율에 따른 전력변화를 나타내고 있다. 보조부하율이 낮고 추진부하율이 높은 구간에서 전체부하는 추진부하를 따라가며, 보조부하율이 높고 추진부하율이 낮은 구간에서는 전체부하는 보조부하를 따라가게 된다. 또한 추진부하의 비율이 높아질수록 부하의 변동 폭이 커지기 때문에 여유 전력을 충분히 확보해야한다.

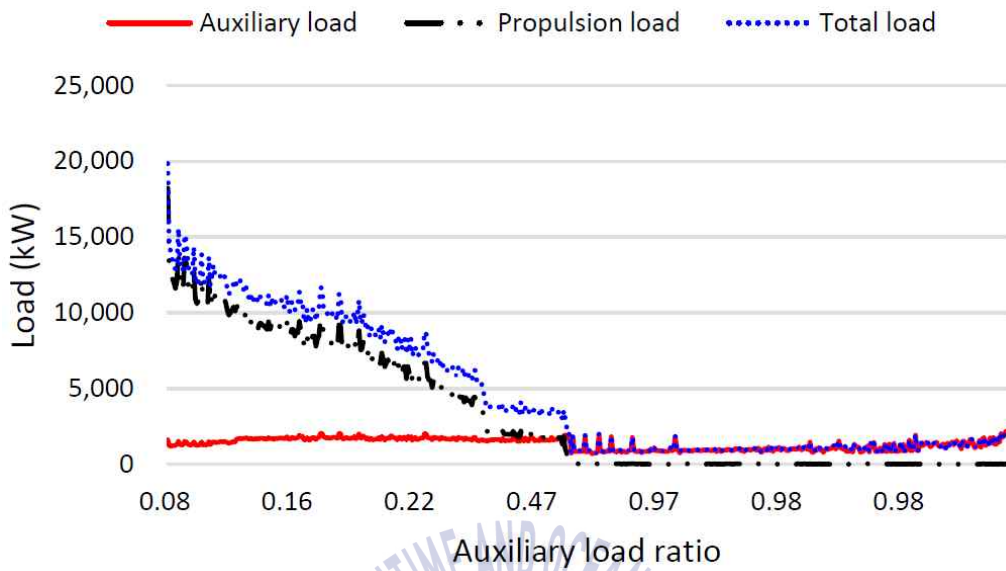


Fig. 27 Load change due to the variation of the auxiliary load ratio

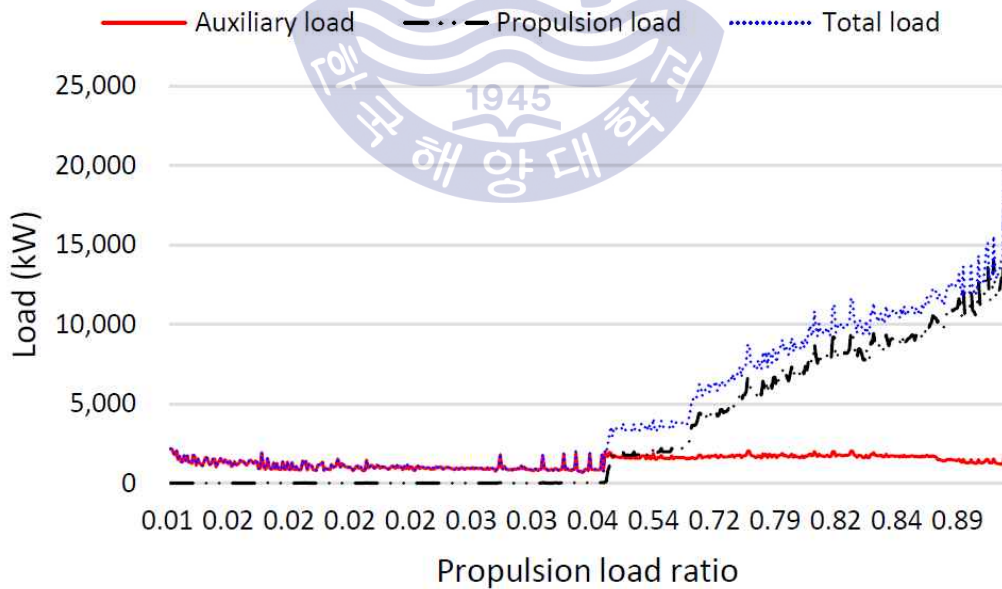


Fig. 28 Load change due to the variation of the propulsion load ratio

추진부하가 전체부하에서 높은 비율을 차지하는 경우, 부하의 변동이 크게 발생한다고 판단되며 부하 변동에 대응하기 위해서 충분한 여유 전력 확보가 필요하다. 이 여유전력은 발전기 부하율에 여유를 두거나 배터리를 통해 확보가 가능하다. 발전기를 발전 효율이 높은 구간에서 운용할 시에는 여유전력이 부족하게 되므로 배터리의 여유잔량을 충분히 확보해야 한다. 부하제어 알고리즘은 추진부하의 변동가능 범위와 배터리의 SOC 및 발전기 여유 부하율을 고려하여 발전기-배터리 간의 부하 분담율과 배터리 충·방전 상태를 결정하도록 한다.

반면 보조부하가 전체부하에서 높은 비율을 차지하는 경우, 부하의 변동이 작다고 판단되며 부하변화에 대응하기 위한 발전기 및 배터리의 여유전력 기준을 낮춰 설계한다.

(4) 부하제어 알고리즘의 모드 정의

부하 특성에 따른 모드는 크게 세 가지로 나눌 수 있으며, 이는 선박의 운용 모드로 설명이 가능하다. 다음 Table 16은 세 가지 모드에 대한 보조부하와 추진부하 및 전체부하의 특성에 대해서 정리한 표이다.

Table 16 Characteristic of mode of propulsion system operation

모드 구분 부하 구분	Mode_S				Mode_H				Mode_P			
	최소	평균	최대	분산	최소	평균	최대	분산	최소	평균	최대	분산
보조부하(kW)	1,215	1,656	2,037	172	1,507	1,638	1,952	96	682	1,083	2,157	287
추진부하(kW)	3,612	8,152	18,220	2,492	777	1,097	4,436	1,451	16	24	101	9
전체부하(kW)	5,202	9,808	19,846	2,413	2,476	3,555	4,436	303	705	1,108	2,177	291

자기조직화지도 수행 결과를 바탕으로 모드를 구분하였다. 첫 번째 모드의 특성은 항해 중에 주로 나타나는 특성으로 Mode_S(seagoing), 두 번째 모드의

특성은 입출항 중에 주로 나타나는 특성으로 Mode_H(harbour), 세 번째 모드의 특성은 정박상태에서 주로 나타나는 특성으로 Mode_P(port)로 정하였다. 각 모드별 특성은 다음 Table 17과 같다.

Table 17 Modes of propulsion system operation

모드	Mode_P	Mode_H	Mode_S
추진부하비(%)	0~5	31~65	69~92
보조부하비(%)	95~100	35~69	8~31

① Mode_P

정박상태로 대표되는 모드로, 전체 부하의 대부분이 보조부하이며 따라서 변동 특성 또한 보조부하를 따라간다. 다른 모드와 비교하여 보조부하의 변동율이 가장 크다. 이는 입출항으로 넘어가는 단계 또는 추진시스템이 동작하고 있지만 선속이 측정되지 않은 상태로 확인된다.

② Mode_H

입출항상태로 대표되는 모드로, 추진부하와 보조부하의 비율이 비슷하다. 전체 운항시간에서 차지하는 비율이 가장 작다. 추진부하의 변동율이 크게 나타난다.

③ Mode_S

항해상태로 대표되는 모드로, 전체 부하의 대부분이 추진부하로 구성되어 변동 특성 또한 추진부하를 따라간다. 전체부하 및 추진부하의 변동율이 가장 크게 나타난다. 전체부하에서 추진시스템이 차지하는 비율은 62~92 %이다. 동일한 선속에서도 다양한 추진전력을 보이며, 추진시스템에 의한 부하 변동이 크기 때문에 여유 전력을 충분히 확보해야 한다.

4.3 에너지계수 산정

4.3.1 기존 에너지관련 계수

(1) 부하계수 (Load Factor, LF)

부하계수를 이용한 부하분석은 선박의 전체 부하목록과 소요전력량, 운용시간비율을 필요로 하며, 선박의 운용 모드를 적용하면 분석결과의 신뢰도를 높일 수 있다. 다음 식 (13)을 통해 부하계수를 구할 수 있다[17].

$$LF = \frac{P_{mean}}{P_{max}} = \frac{W}{t \cdot P_{max}} \quad (13)$$

여기서 LF 는 부하계수[무차원수], P_{mean} 은 평균사용전력[kW], P_{max} 는 최대사용전력[kW], W 는 총사용전력량[kWh], t 는 측정시간[h]으로, 부하계수는 계측시간 동안 최대 부하에 대한 평균 부하의 비로 나타낼 수 있다. 장비 소요전력을 정격전력까지 사용한다고 가정하면, 다음 식 (14)와 같이 부하계수와 장비의 정격전력을 통해 평균 전력을 구할 수 있다.

$$P_{mean} = LF \cdot P_{rated} \quad (14)$$

여기서, P_{mean} 은 평균전력[kW], LF 는 부하계수[무차원수], P_{rated} 는 장비의 정격전력[kW]이다. 부하계수는 환경이나 운용모드에 따라서 다르게 산정될 수 있으므로 필요한 조건의 부하계수를 정하여 분석한다. 일반적으로는 선박의 운용모드(항해, 정박, 입출항 등)에 따라 구분하며, 운용모드는 선종에 따라서도 달라질 수 있다. 또한 온도에 따라 사용전력이 달라지는 펌프, 히터 등 일부 부하에 대해서는 여름철과 겨울철로 구분된다.

부하계수를 이용한 전력 추정은 전체 전력 운용 기간에 대한 평균값으로서 선박의 평균 전력량을 추정하기에 적합하며, 부하 사용의 범위 등의 정보는 알

수 없다. 따라서 부하계수를 통한 부하분석은 평균적인 전력 사용량에 대한 정보를 제공하게 되며, 사용 빈도가 높은 전력량과 최대 전력량을 함께 고려해야 한다.

2) 가용성계수(Availability Factor, AF)

가용성 계수란, 특정 기간에 대해서 전기를 생산할 수 있는 시간을 해당기간의 시간으로 나눈 값으로 다음 식 (15)로 표현된다.

$$AF = \frac{t_{a.t.g}}{t} \quad (15)$$

여기서, AF 는 가용성계수[무차원수], $t_{a.t.g}$ 는 전력생산이 가능한 시간[h], t 는 측정 시간[h]이다. 이는 유지보수 기간에 의해서 발생하는 전력생산 중단을 의미하여 유지 및 보수 기간이 적은 재생에너지의 경우 높은 가용성 계수를 갖는다. 예를 들어 현대의 풍력 발전의 경우, 98 %의 가용성 계수를 가지며, 태양광 발전의 경우, 유지보수를 발전하지 않는 야간시간에 계획한다면 가용성 계수는 100 %가 된다.

3) 용량계수(Capacity Factor, CF)

용량계수는 실제 전력에너지 출력에 대해 최대로 가능한 출력의 비율을 의미하여 다음 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CF = \frac{W}{W_{\max}} = \frac{W}{t \cdot P_{\max}} \quad (16)$$

여기서, CF 는 용량계수[무차원수], W 는 총사용전력량[kWh], W_{\max} 는 최대사용전력량[kWh], t 는 측정시간[h], P_{\max} 는 최대사용전력[kW]이다. 용량계수의 측정시간은 연속운전을 하는 시간이라고 가정한다. 전력의 생산을 비교하는 데 유용하다. 대부분 1년 단위로 계산되지만, 시스템의 특성에 따라 시스템의 수명기간, 분기별, 월별 등의 기간으로 계산될 수 있다.

4) 수요계수(Demand factor, DF)

수요계수는 시스템에서 사용가능한 최대 전력량에 대해서 사용되는 전력량을 나타낸다. 수요계수는 항상 1보다 작거나 같다. 수요 전력량은 시간에 의존하는 값으로 수요 계수도 마찬가지로이다. 수요계수는 다음의 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$DF = \frac{W}{W_{\max}} = \frac{P_{\text{mean}}}{P_{\max}} \quad (17)$$

여기서, DF 는 수요 계수[무차원수], W 는 총사용전력량[kWh], W_{\max} 는 최대사용전력량[kWh], P_{mean} 은 평균사용전력[kW], P_{\max} 는 최대사용전력[kW]이다.

4.3.2 에너지 계수의 설계

부하제어 알고리즘의 에너지유연성과 에너지효율성을 판단하기 위해서 에너지 계수를 설계하였다. 에너지유연성은 발전기 및 배터리가 부하 변동에 대응할 수 있는 정도를 의미한다. 앞서 모드별 특성을 적용하여 모드에 따른 요구 확보 전력을 기준으로 계산한다. 에너지효율성의 경우 발전기가 효율적인 운용을 하고 있는 정도를 나타낸다.

(1) 에너지유연성(Energy Flexibility, EF)

에너지유연성은 시스템에 에너지를 공급하기 위해서 여유 전력을 확보하고 부하 변화에 대응하는 정도를 의미한다. 전기추진시스템에서는 발전기 및 배터리를 통한 부하 분배가 가능해지고, 부하 상태에 따라 비중요 부하군의 부하를 낮춤으로써 에너지유연성을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 발전기와 배터리간의 부하분배를 통한 에너지유연성 확보에 대해서 연구하였고, 따라서 전기추진 시스템에서 에너지유연성을 다음 식 (18)와 같이 정의하였다.

$$EF = \frac{1}{P_e} \left(\sum_{k=0}^n P_{\text{gen, avail}}(k) + \frac{SOC_{\text{batt}}}{cr} \right) \quad (18)$$

여기서, EF 는 에너지유연성[무차원수], P_e 는 요구 전력여유율[kW], n 은 항차별 측정 데이터 개수[개], $P_{gen,avail}$ 은 발전기 여유부하[kW], SOC_{batt} 은 배터리 잔량[kWh], cr 은 배터리의 C-rate[C]를 의미한다. 에너지유연성이 클수록 부하 변동에 따라 활용할 수 있는 에너지가 충분하다는 의미를 갖는다. 에너지 유연성을 결정할 때는 요구 전력여유율 P_e 를 설정하여 해당되는 모드에서 발생가능한 부하의 3분위수를 포함하는 상태를 $EF=1$ 로 정의한다. 이는 현재 모드에서 예상되는 피크 부하의 $P_{average} + 3\sigma$ 까지 여유 전력이 확보되어 부하변동에 대응이 가능함을 의미한다. 여기서 σ 는 표준편차를 의미한다.

(2) 에너지효율성(Energy Efficiency, EE)

에너지효율성은 발전시스템이 효율적인 운용을 하고 있는 정도를 의미한다. 발전기의 최적운용부하를 기준으로 현재 운용부하가 어느 정도의 최적 운용 범위를 만족하는지를 나타낸다. 부하제어 알고리즘은 에너지유연성을 확보하면서 배터리의 충·방전을 조정하여 에너지효율성이 높은 운용을 가능하게 하는 것이 목적이다. 에너지효율성은 다음 식 (19)과 같이 정의하였다.

$$EE = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^g \frac{P_k}{P_{op}} \quad (19)$$

여기서, EE 는 에너지효율성 계수[무차원수], P_k 는 k 번째 발전기의 현재 부하[kW], P_{op} 는 발전기 최적운용부하[kW], g 은 발전기 대수[무차원수]이다.

4.4 전기추진시스템의 부하제어 알고리즘

현재 부하 상태를 수집하여 부하 상태에 따른 모드를 결정하고, 모드에 따른 부하 특성을 고려하여 에너지유연성과 에너지효율성을 제공한다. 전기추진시스템에 적용되는 부하제어 알고리즘은 여유 전력을 확보하면서 에너지효율성을 높이는 것이 중요하다. 에너지유연성을 확보하면서 에너지효율성을 높일 수 있는 제어를 수행한다. 다음 Fig. 29는 부하분석 기반의 부하제어 알고리즘이다.

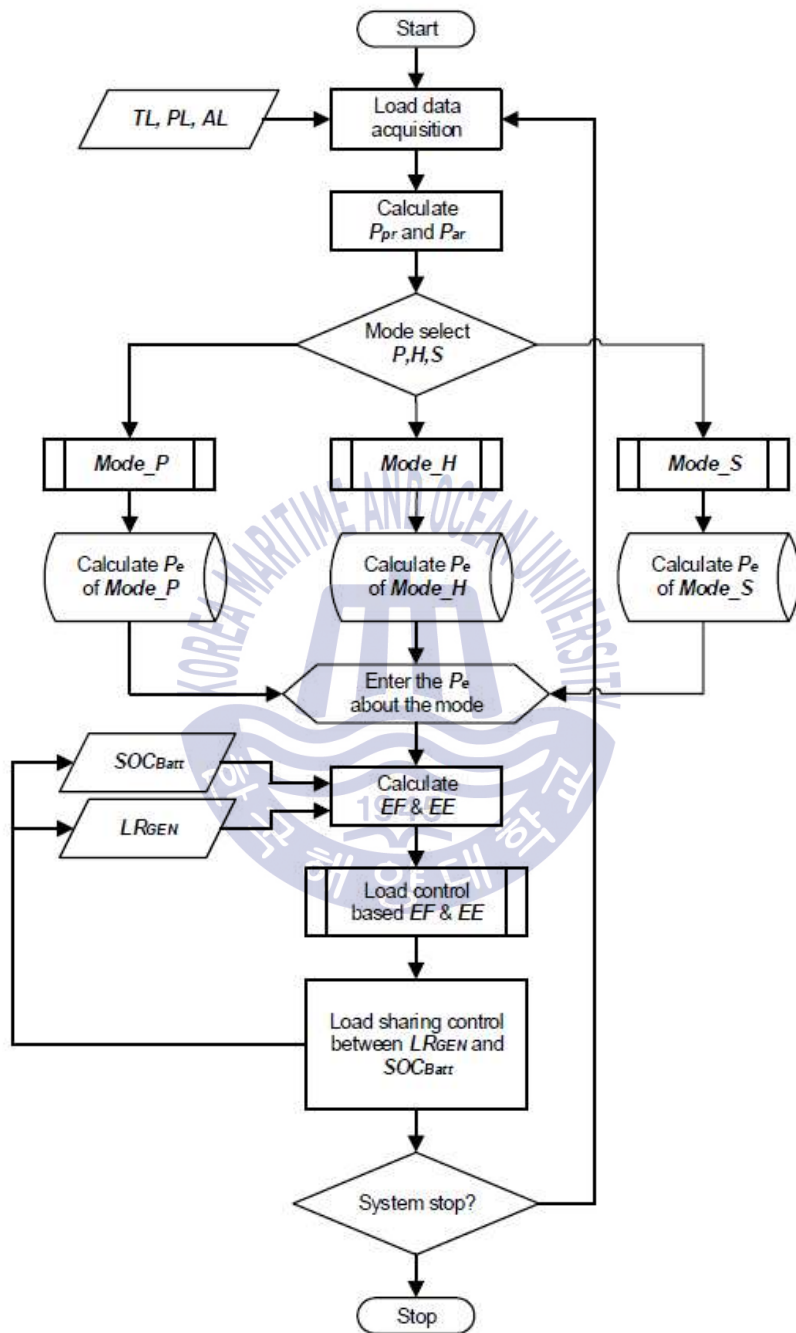


Fig. 29 LCS algorithm based on load analysis

부하제어 알고리즘은 모드 설정, 요구 전력여유율 결정, 에너지유연성 및 에너지효율성 계산, 부하분배, 시스템 상태 확인으로 구성된다. 제어 수행 내용은 다음 Table 18에 정리되었다.

Table 18 Step-by-step control of the LCS algorithm

단계	단계별 제어내용	제어 수행 내용
단계 1)	모드 설정	전체부하 TL , 추진부하 PL , 보조부하 AL 수집 추진부하율 P_{pr} 및 보조부하율 P_{ar} 계산을 통한 모드($Mode_P$, $Mode_H$, $Mode_S$) 결정
단계 2)	요구 전력여유율 결정	모드에 따른 요구 전력여유율 P_e 계산
단계 3)	EF, EE 계산	요구 전력여유율 P_e , 발전기 부하율 LR_{GEN} , 배터리 잔량 SOC_{batt} 로부터 에너지유연성 EF 과 에너지효율성 EE 계산
단계 4)	부하분배	에너지유연성 및 에너지효율성 기반 발전기-배터리 부하분배 수행
단계 5)	시스템 상태 확인	시스템 상태 확인 후 종료 또는 단계 1로 이동

4.4.1 모드 설정

측정된 전체부하, 추진부하, 보조부하를 바탕으로 추진부하율과 보조부하율을 계산한다. 추진부하율과 보조부하율은 각각 다음 식 (20)~(21)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{pr} = \frac{PL}{TL} \quad (20)$$

$$P_{ar} = \frac{AL}{TL} \quad (21)$$

여기서, P_{pr} 은 추진부하율[%], P_{ar} 은 보조부하율[%], PL 은 추진부하[kW], TL 은 전체부하[kW], AL 는 보조부하[kW]를 의미한다. 도출된 부하율에 따라서 모드가 결정되며, 기준값은 다음 Table 19와 같이 결정한다.

Table 19 Determine mode according to load ratio and total load

	Mode_P	Mode_H	Mode_S
추진부하율(%)	0~5	31~65	69~100
보조부하율(%)	95~100	35~69	0~31
전체부하(kW)	705~2,177	2,476~4,436	5,202~19,846

4.4.2 모드에 따른 요구 전력여유율 결정

결정된 모드에 따른 요구 전력여유율을 결정한다. Mode_P의 경우는 전체부하가 보조부하의 특성을 따라가며, Mode_S의 경우는 추진부하의 특성을 따라가게 된다. Mode_S에서는 상대적으로 추진부하의 변동이 크기 때문에 요구 전력여유율을 높게 설정해야한다. 사용한 데이터는 클러스터링을 통해 발생 빈도가 높은 부하를 선정하였으므로 최대 부하를 포함하도록 요구 전력여유율을 결정하였다. 다음 Table 20은 모드에 따른 요구 전력여유율을 나타낸다.

Table 20 Required load margin according to mode

모드	평균부하(kW)	요구여유전력(kW)
Mode_P	1,108	2,147
Mode_H	3,555	4,076
Mode_S	6,508	19,846

4.4.3 에너지유연성과 에너지효율성 계산

에너지유연성과 에너지효율성은 앞서 4.3절에서 도출된 에너지유연성 계수식 (18)과 에너지효율성 계수식 (19)를 통해 계산된다. 에너지유연성이 충분하면 에너지효율성을 높이기 위해 부하분배를 수행한다. 다음 4.4.4의 Fig. 30는 계산된 에너지유연성과 에너지효율성을 이용한 발전기 부하분배 수행 알고리즘이다.

4.4.4 발전기 부하분배 수행

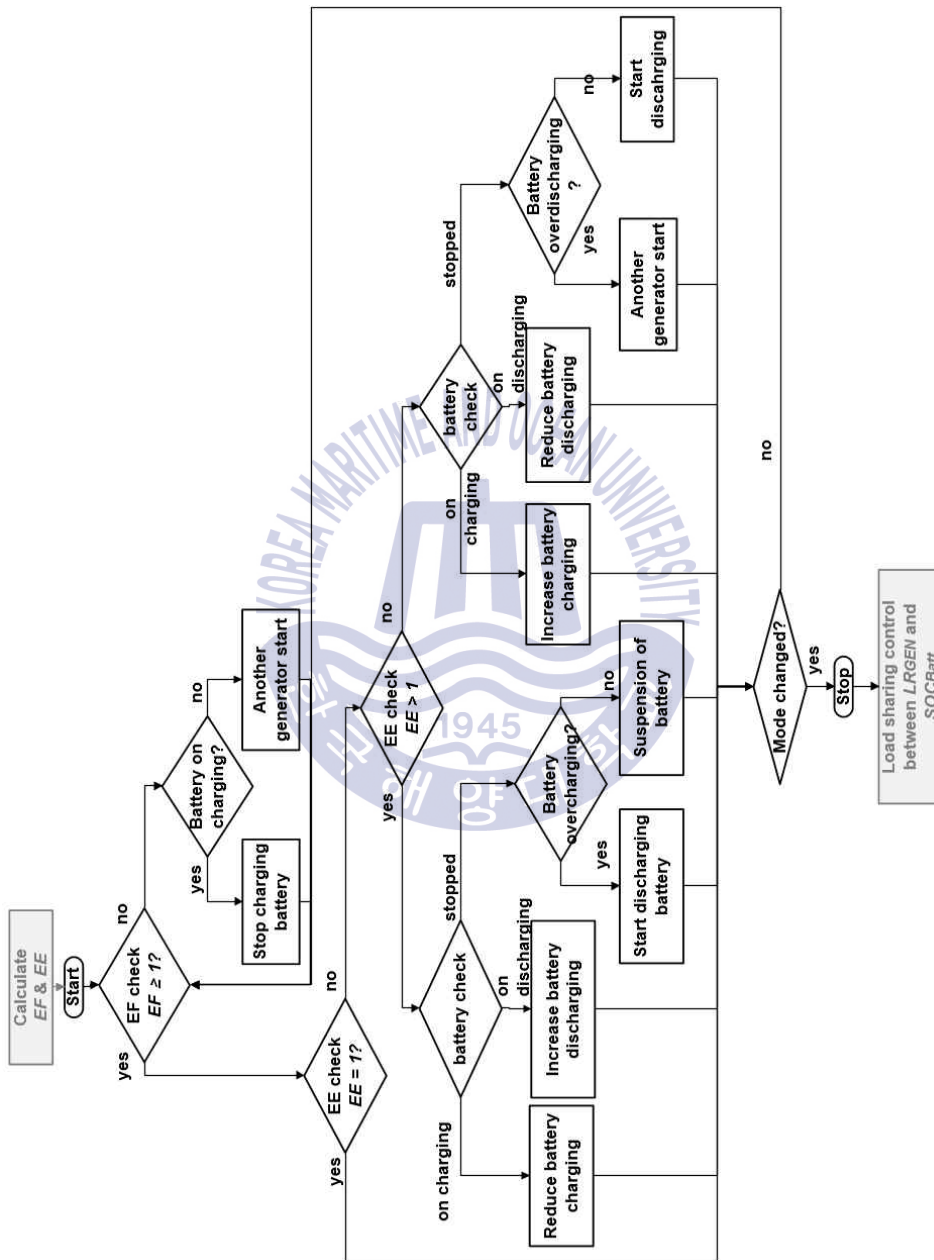


Fig. 30 Load sharing algorithm of LCS

에너지유연성 계수가 1보다 작으면 전력시스템의 여유전력이 부족하여 발생 가능한 부하변동에 대응하지 못하는 상태이다. 배터리 충전상태일 경우 충전을 중지시키고, 배터리 충전상태가 아닐 경우, 발전기 추가운전을 수행한다.

에너지유연성이 충분히 확보되었다고 판단되면, 에너지효율성 계수를 확인한다. 에너지효율성 계수가 1에 가까울수록 발전기가 최적 효율 구간에서 운전 중임을 의미한다. 에너지효율성 계수가 1보다 작을 경우 저부하 운전이며, 1보다 클 경우는 고부하 운전에 해당된다.

발전기 고부하 운전 상태일 경우, 배터리 상태를 확인한다. 배터리가 충전중일 경우, 배터리 충전량을 감소시킨다. 배터리가 방전중일 경우, 방전량을 증가시킨다. 배터리가 휴지상태일 경우 과충전 상태임을 확인하여 방전을 시작하거나 상태를 유지한다.

발전기 저부하 운전 상태일 경우, 배터리 상태를 확인한다. 배터리가 충전중일 경우, 배터리 충전량을 증가시킨다. 배터리가 방전중일 경우, 방전량을 감소시킨다. 배터리가 휴지상태일 경우 과방전 상태임을 확인하여 충전을 시작하거나 상태를 유지한다.

4.4.5 시스템 종료 또는 단계 1로 이동

이후 시스템 종료 명령 또는 시간 초과에 따라 단계 1로 이동하여 알고리즘을 수행한다.

제 5 장 시뮬레이션

본 장에서는 디젤엔진을 원동기로 사용하는 발전기 4대와 에너지 저장 시스템으로서 배터리, 추진전동기로 추진하는 전기추진시스템을 대상으로 부하제어 알고리즘을 적용하여 연료소비율 비교를 통해 최적의 에너지 관리 알고리즘을 제안하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 따라서 시뮬레이션은 다음 가정을 만족하여 수행된다.

- ① 시뮬레이션은 입력된 부하 시나리오로 수행된다.
- ② 발전원으로 디젤발전기, 배터리를 포함하고, 전력부하로 추진전동기, 보조부하로 구성된다.
- ③ 발전기 부하율 분담 역할을 하는 전력관리시스템과 배터리 보호 기능을 갖는 배터리관리시스템을 포함하고, 부하 모니터링을 통해 전력관리시스템과 배터리관리시스템 간의 부하 분담을 하는 부하제어 알고리즘을 포함하는 부하제어시스템으로 구성된다.
- ④ 본 시뮬레이션에 포함된 연료 소모량 시뮬레이션은 에너지 절감율을 비교하기 위한 목적으로 수행된다. (알고리즘의 경제성 평가는 수행되지 않음)

시뮬레이션의 목적에 따라 시뮬레이션의 기능을 결정하고 난 뒤, 시스템 기능에 따른 시스템 구성요소의 인터페이스 정의, 매개변수 확인, 수학적 해석 등을 결정해야 한다. 다음은 시뮬레이션 모델 제작의 기본적인 순서에 대해서 설명한다[18].

- ① 시스템 구성요소의 인터페이스 정의 : 하위 모델에 대해서 입력 변수와 출력 변수를 정의한다. 본 연구에서는 부하시나리오를 입력하여 연료소비율을 비교하는 것이 목적으로, 하부 모델에 대해서도 이 목적에 부합하는 인터페이스를 정의한다.

- ② 구성요소의 세부동작을 제어하는 매개변수 확인 : 하위 모델의 동작을 정의하기 위해 필요한 매개변수를 확인한다. 발전기의 용량, 배터리의 용량, 배터리 초기 용량 등이 이에 해당된다.
- ③ 시스템 구성요소의 수학적 해석 결정 : 시뮬레이션의 목적에 맞는 수학적 해석을 결정한다. 하위 모델이 시뮬레이션 전체 목적에 부합하도록 인터페이스로 선택된 변수를 도출할 수 있고 물리적으로 타당하다고 판단되는 해석을 선정한다.

5.1 시뮬레이션 구성

시뮬레이션은 Matlab Simulink를 이용하여 수행되었으며, 전기추진시스템을 나타내는 전체 시스템 하위에 발전시스템, 배전시스템, 배터리시스템, 부하제어시스템, 전력제어시스템, 배터리관리시스템으로 구성된다.

5.1.1 전체 시스템

시뮬레이션은 MATLAB의 work space로부터 시스템의 제원 및 부하시나리오를 불러오는 데이터 입력부, 발전기와 배터리간의 부하분배 알고리즘을 포함하고 있는 부하제어시스템부, 부하제어 알고리즘에 따라 분배된 부하에 따라 발전기를 운용하는 전력관리시스템부, 전력관리시스템의 명령에 따라 발전기를 운용하여 연료소비율을 도출하는 발전시스템부, 부하제어시스템에서 분배된 부하에 따라 배터리 충·방전과 과충전 과방전을 방지하는 배터리관리시스템부, 배터리관리시스템의 명령에 따라 충·방전을 통해 배터리 용량을 계산하는 배터리부, 수집된 부하시나리오와 발전기 및 배터리 데이터를 조합하는 배전반부로 나누어진다. 다음 Fig. 31은 시뮬레이터 전체 시스템을 나타낸다.

5.1.4 발전기부

발전기는 전력관리시스템으로부터 입력받은 명령에 따라서 전력을 발생시킨다. 또한 부하율에 따라서 SFC 곡선을 통해 연료 소모량을 계산한다. Fig. 34는 발전기부를 나타낸다.

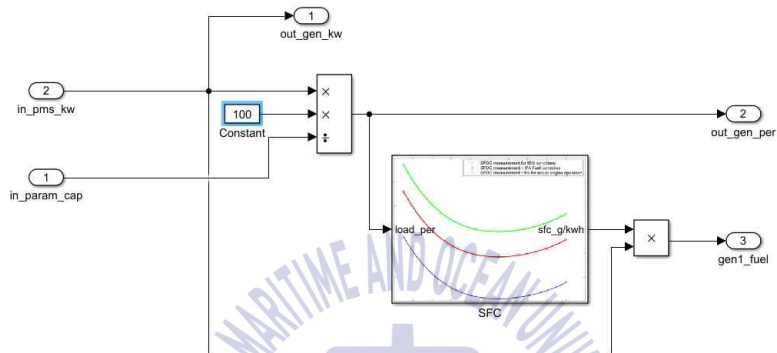


Fig. 34 Generator model of simulation program

5.1.5 배터리관리시스템부 및 배터리부

배터리부는 부하에 따라 배터리의 SOC를 출력하고, 배터리관리시스템부는 배터리의 SOC를 모니터링하여 과충전 또는 과방전시 충·방전을 정지한다. Fig. 35는 배터리관리시스템부와 배터리부를 나타낸다.

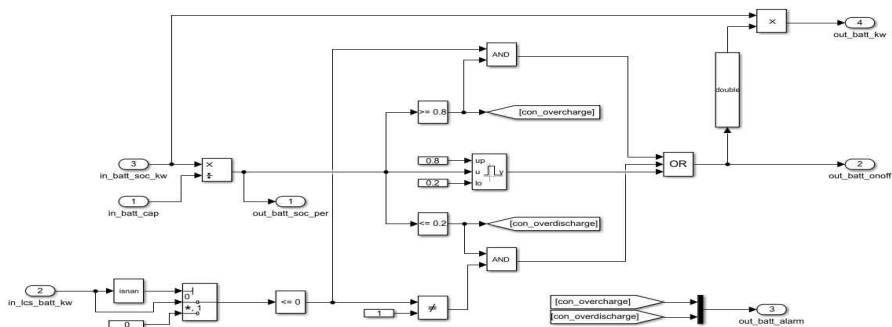


Fig. 35 BMS and Battery model of simulation program

5.1.6 부하 시나리오 및 배전반부

Fig. 36은 배전반부로, 추진부하 및 보조부하의 부하시나리오를 전달받아 시스템에 요구하는 전력을 계산한다. 총 부하가 발전기 및 배터리 공급부하보다 클 경우, 배터리에서 추가로 부하를 부담하게 된다.

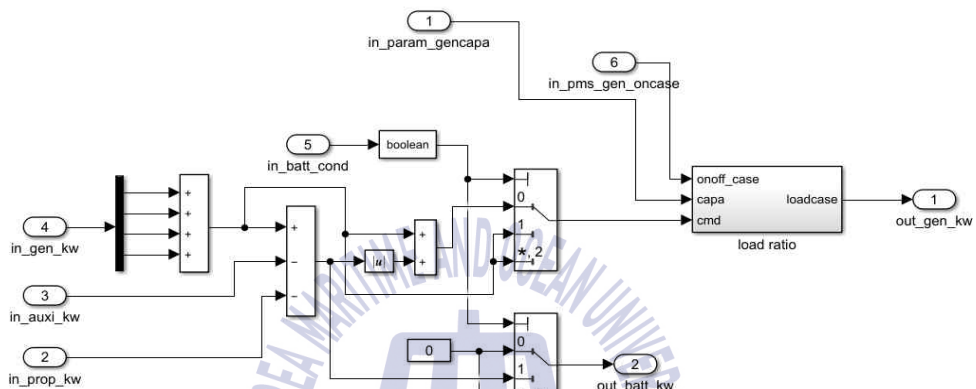


Fig. 36 Load scenario and distribution panel model of simulation

5.2 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 모델에 대해서 55항차의 부하 시나리오를 입력하여 전력관리시스템 단독 제어 케이스와 부하제어시스템-전력관리시스템 부하제어 케이스 두 가지로 나누어 동작을 확인하였다. 다음은 총 55항차 중 전력관리시스템 단독 제어와 부하제어시스템-전력관리시스템 통합 제어에서 비교하여 관찰 할 수 있는 대표적인 7개 항차에 대해서 시뮬레이션 한 결과를 제시하고 분석을 진행하였다. 시뮬레이션 결과로 분석한 항목은 다음과 같다.

- ① 부하 시나리오 : 입력한 부하 시나리오로, 총 55항차로 구성된다. 추진부하와 보조부하 및 추진부하와 보조부하를 합한 전체부하로 구성된다.

- ② 부하-발전기-배터리 : 부하 시나리오에 따라 발전기의 전력 공급 및 배터리 충·방전 결과를 나타낸다. 전력관리시스템 제어 결과와 부하제어시스템 제어 결과를 비교하였다.
- ③ 발전기 : 부하 시나리오에 따라 발전기 4대의 출력을 전력 [kW]와 부하율 [%]로 나타내었다. 전력관리시스템 제어 결과와 부하제어시스템 제어 결과를 비교하였다.
- ④ 배터리 : 배터리의 충·방전에 따른 SOC 변화를 나타내었다. 전력관리시스템에 의한 제어 결과와 부하제어시스템에 의한 제어 결과를 비교하였다.
- ⑤ 에너지효율성 및 에너지유연성 : 부하 시나리오에 따라 에너지효율성과 에너지유연성의 변화를 나타내었다. 전력관리시스템의 제어 결과와 부하제어시스템의 제어 결과를 비교하였다.
- ⑥ 연료 소모율과 배터리 잔량 : 해당 항차의 연료소비율과 배터리 잔량을 표시하였다. 전력관리시스템의 제어 결과와 부하제어시스템의 제어 결과를 비교하였다.

5.2.1 항차 1에 대한 시뮬레이션 결과

(1) 부하 시나리오

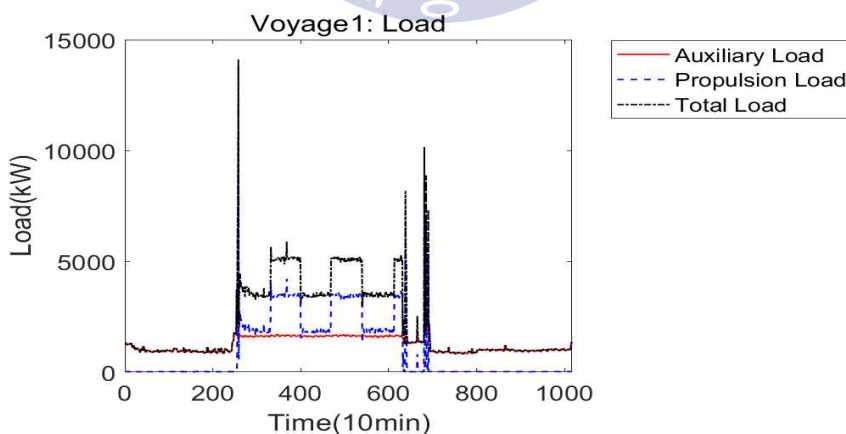


Fig. 37 Load scenario of voyage 1

Fig. 37은 부하제어시스템 시뮬레이션 프로그램에 입력되는 항차 1에 대한 부하시나리오를 나타낸다. 시간 축은 10분단위이며, 2,450분에서 발생한 입출항에서 중부하 및 추진부하의 합으로 큰 부하가 발생한 것으로 확인된다.

(2) 부하-발전기-배터리

- 전력관리시스템

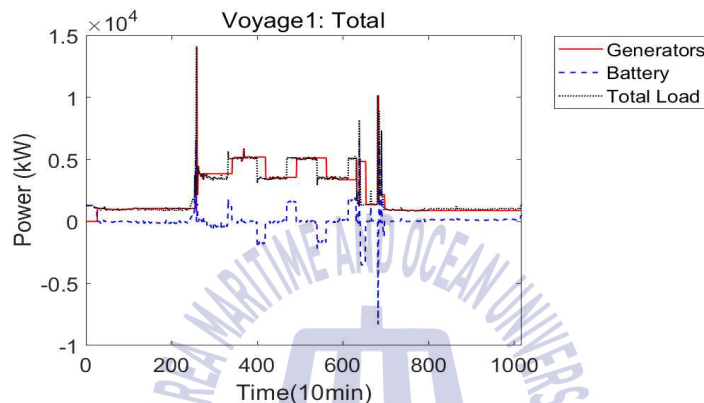


Fig. 38 Total load controlled by PMS of voyage 1

전력관리시스템 제어 시 Fig. 38과 같이 전체부하와 발전기 부담 및 배터리 부담부하를 나타내었다. 배터리가 우선적으로 부하를 부담하고 발전기가 따라서 부하를 부담한다.

- 부하제어시스템

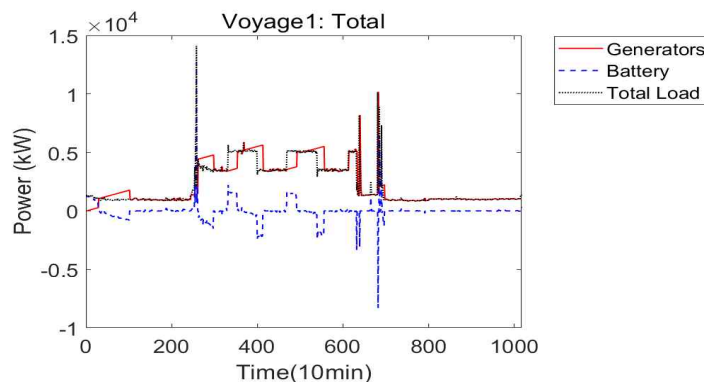


Fig. 39 Total load controlled by LCS of voyage 1

Fig. 39은 부하제어시스템 제어 시 부하 변화에 대해서 나타내었다. 에너지유연성이 충분히 확보될 경우, 에너지효율성을 높이기 위해서 발전기 부하를 조정하게 된다. 부하제어 알고리즘에 의해 부하변화에 대응하면서 동시에 발전기 부하를 높이는 것을 확인할 수 있다.

(3) 발전기

- 전력관리시스템

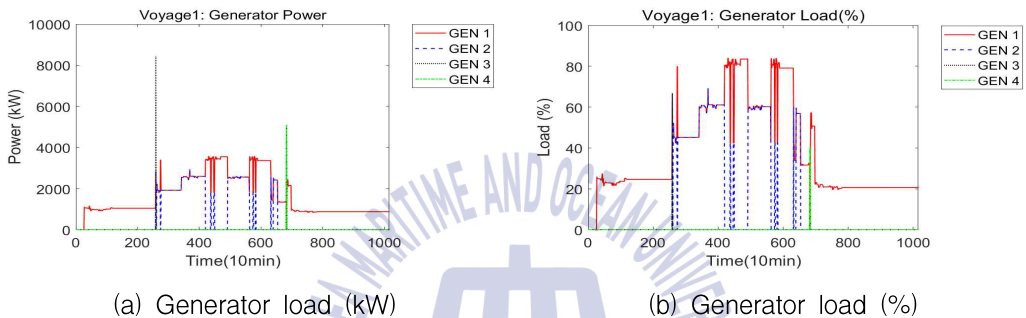


Fig. 40 Generator load controlled by PMS of voyage 1

전력관리시스템 제어 시 발전기의 부하를 나타내고 있다. 항해 중에는 50~80 % 사이에서 발전기가 운용됨을 Fig. 40에서 확인할 수 있다.

- 부하제어시스템

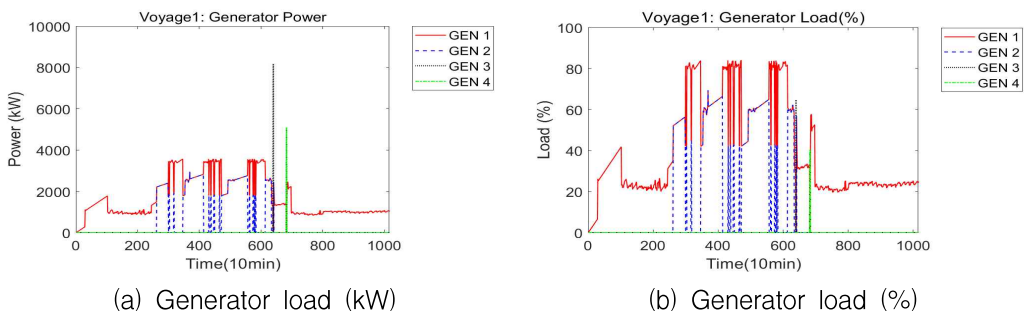


Fig. 41 Generator load controlled by LCS of voyage 1

Fig. 41은 부하제어 알고리즘에 의해 변화하는 발전기 부하율을 나타내고 있다. 전력관리시스템 단독 제어보다 발전기 부하를 높여서 운영하는 것을 확인할 수 있다.

(4) 배터리

- 전력관리시스템

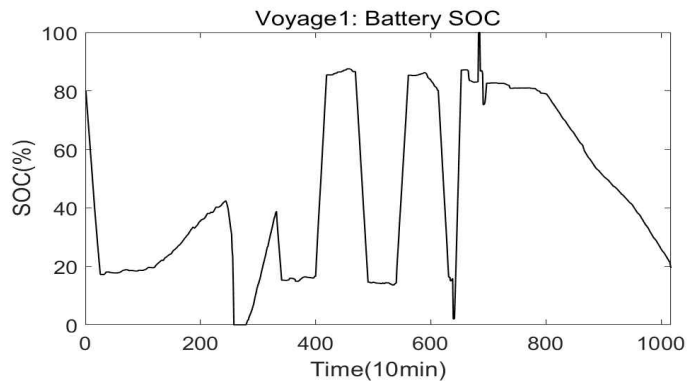


Fig. 42 Battery SOC controlled by PMS of voyage 1

Fig. 42은 전력관리시스템 제어 시 배터리의 SOC 변화를 나타낸다.

- 부하제어시스템

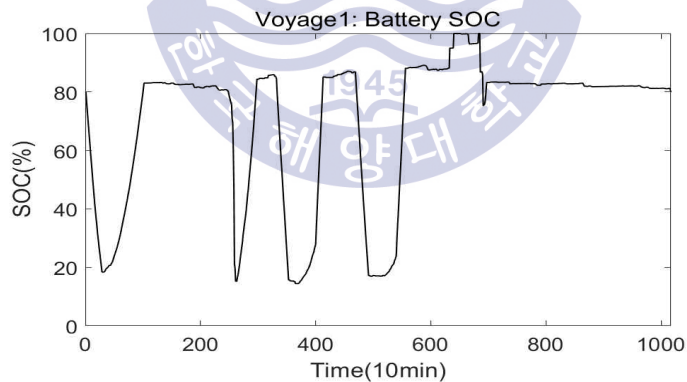


Fig. 43 Battery SOC controlled by LCS of voyage 1

Fig. 43에서 부하제어 알고리즘에 의해 변화하는 배터리 SOC를 확인할 수 있다. 전력관리시스템 단독 제어 시보다 충·방전 빈도가 높다. 이는 전력시스템이 운용할 수 있는 에너지의 유연성이 높다고 판단하여 발전기 부하율을 조정하여 배터리를 충전시켰기 때문으로 확인된다.

5.2.2 항차 25에 대한 시뮬레이션 결과

(1) 부하 시나리오

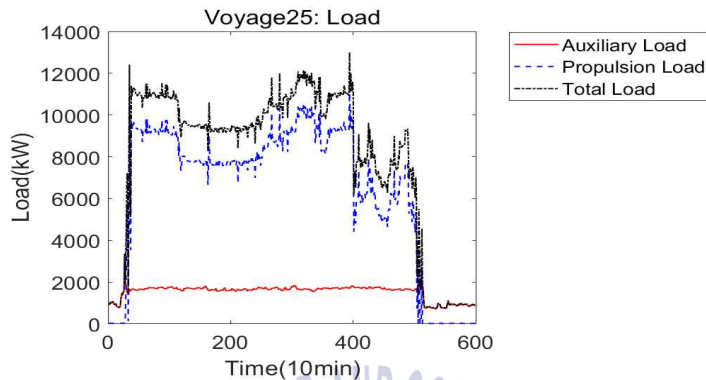


Fig. 44 Load scenario of voyage 25

Fig. 44은 부하제어시스템 시뮬레이션 프로그램에 입력되는 항차 25에 대한 부하시나리오를 나타낸다.

(2) 부하-발전기-배터리

- 전력관리시스템

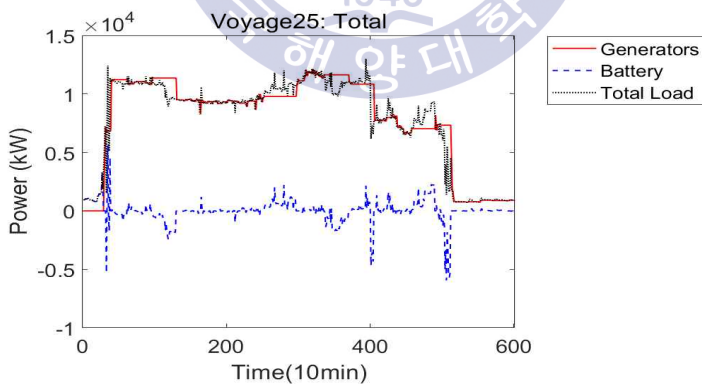


Fig. 45 Total load controlled by PMS of voyage 25

Fig. 45는 전력관리시스템 단독 제어 시 부하에 따른 발전기 및 배터리 운용을 나타낸다. 발전기가 일정한 부하를 유지하면 부하변동에 대해서는 배터리가 부담하는 것을 확인할 수 있다.

- 부하제어시스템

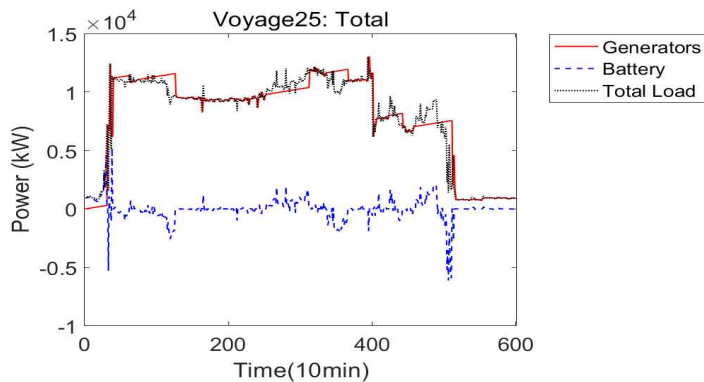


Fig. 46 Total load controlled by LCS of voyage 25

Fig. 46은 부하제어 알고리즘에 의해 제어되는 발전기 및 배터리 운용을 나타낸다. 전력관리시스템 단독 제어 시와 유사하나 추가로 발전기 부하를 증가시키는 것을 확인할 수 있다.

(3) 발전기

- 전력관리시스템

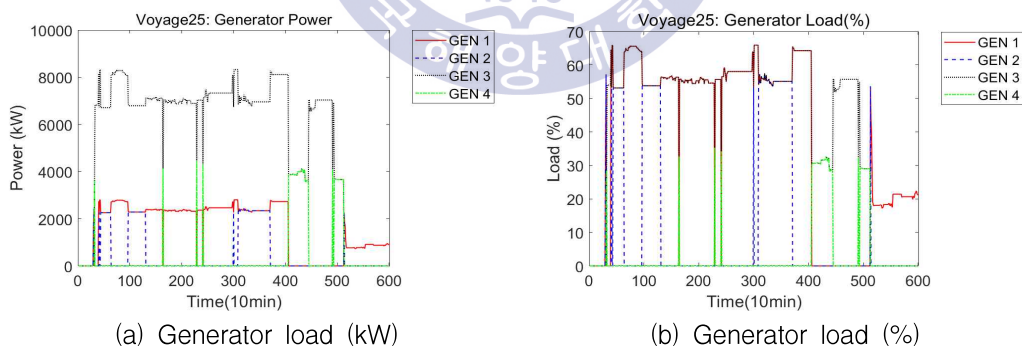


Fig. 47 Generator load controlled by PMS of voyage 25

Fig. 47에서 1번 발전기 및 3번 발전기가 55~65 % 부하율사이에서 주로 운용된다. 2번 발전기의 경우 50~60 % 부하율에서 운용되며, 4번 발전기의 경우 30~40 % 부하율에서 운용되었다.

- 부하제어시스템

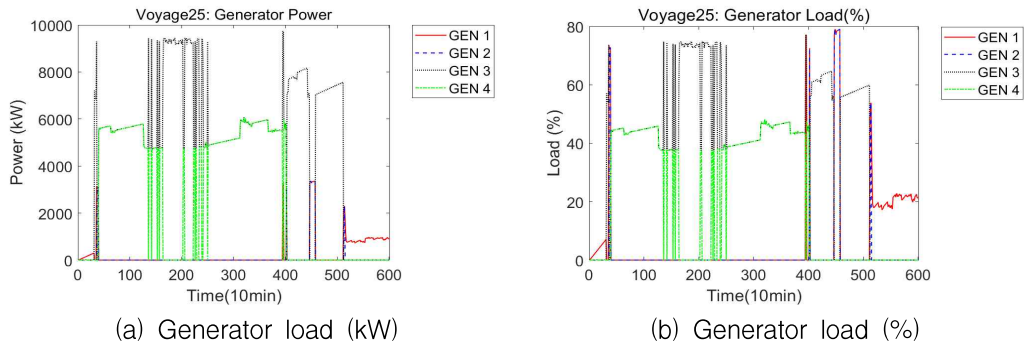


Fig. 48 Generator load controlled by LCS of voyage 25

Fig. 48로부터 1번 발전기와 3번 발전기가 60~70 % 사이에서 운용되며, 4번 발전기가 30~40 %에서 운용됨을 확인할 수 있다.

(4) 배터리

- 전력관리시스템

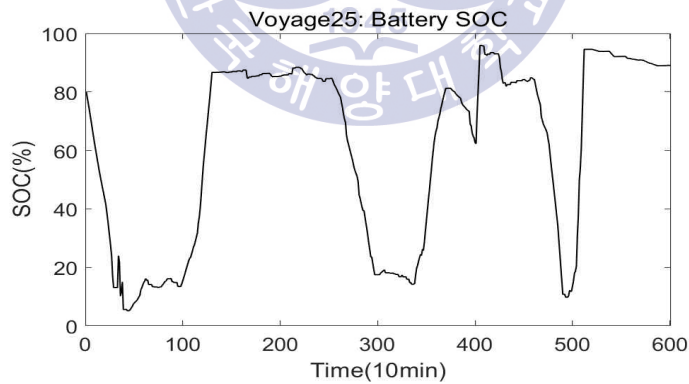


Fig. 49 Battery SOC controlled by PMS of voyage 25

Fig. 49에서 전력관리시스템 제어 시 충·방전을 반복하는 것을 확인할 수 있다.

- 부하제어시스템

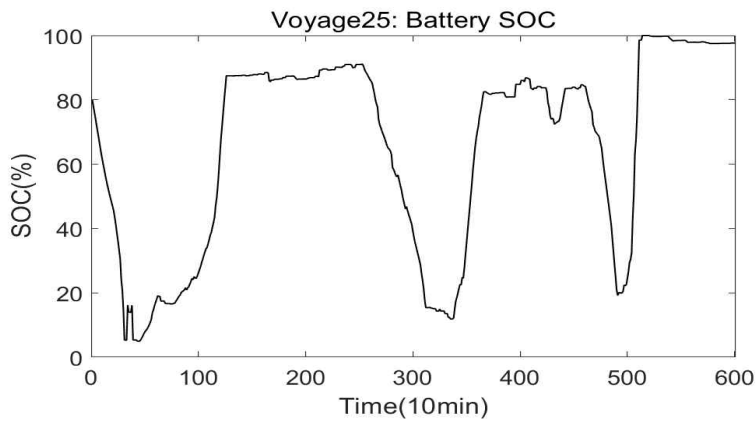


Fig. 50 Battery SOC controlled by LCS of voyage 25

Fig. 50는 부하제어 알고리즘 적용 시 발전기 SOC를 나타낸다. 전력관리시스템 제어 시와 유사하게 나타난다.

5.2.3 항차 48에 대한 시뮬레이션 결과

(1) 부하 시나리오

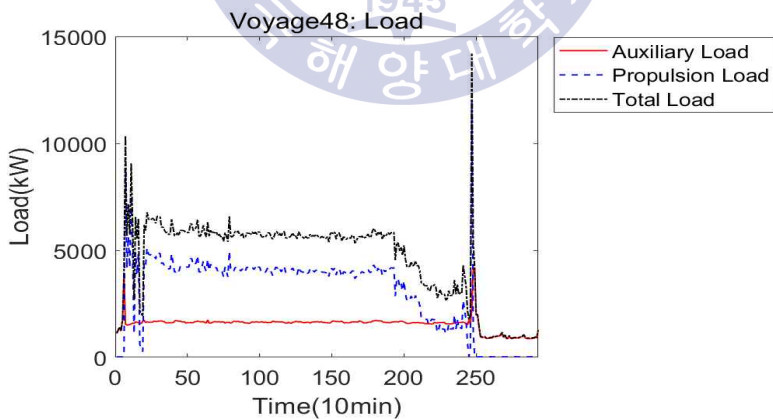


Fig. 51 Load scenario of voyage 48

Fig. 51은 부하제어시스템 시뮬레이션 프로그램에 입력되는 항차 48에 대한 부하시나리오를 나타낸다.

(2) 부하-발전기-배터리

- 전력관리시스템

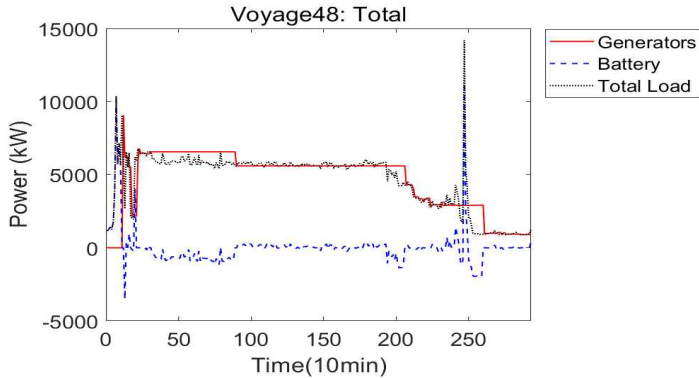


Fig. 52 Total load controlled by PMS of voyage 48

Fig. 52는 전력관리시스템에 의해 제어된 발전기 및 배터리 부하를 나타낸다. 발전기 부하를 일정하게 유지하고, 배터리가 부하 변동에 따라 충·방전을 반복하는 것을 확인할 수 있다.

- 부하제어시스템

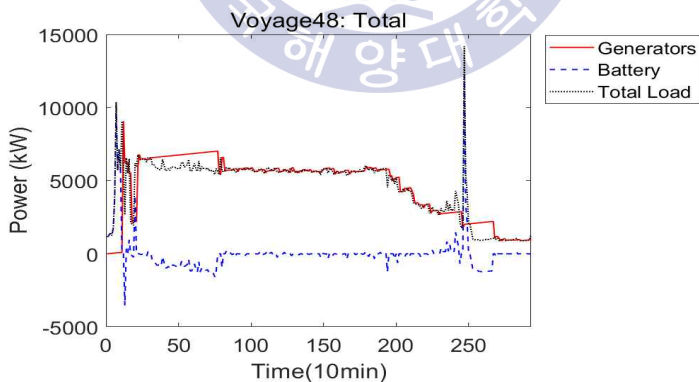


Fig. 53 Total load controlled by LCS of voyage 48

Fig. 53은 부하제어 알고리즘에 의해 제어된 결과를 나타낸다. 800분 이후에는 배터리 부담률은 거의 없고, 발전기가 부하를 부담한다.

(3) 발전기

- 전력관리시스템

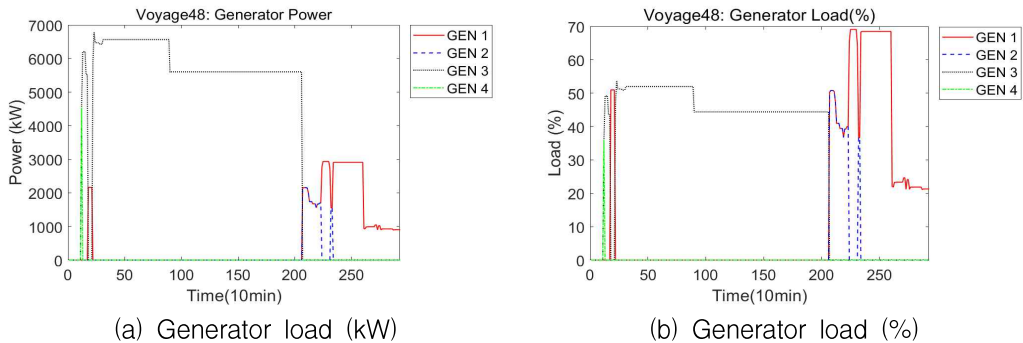


Fig. 54 Generator load controlled by PMS of voyage 48

Fig. 54를 통해 2,000분까지 부하율 50 % 근처에서 발전기가 운용되었고, 이후 70 % 근처에서 발전기가 운용됨을 확인할 수 있다.

- 부하제어시스템

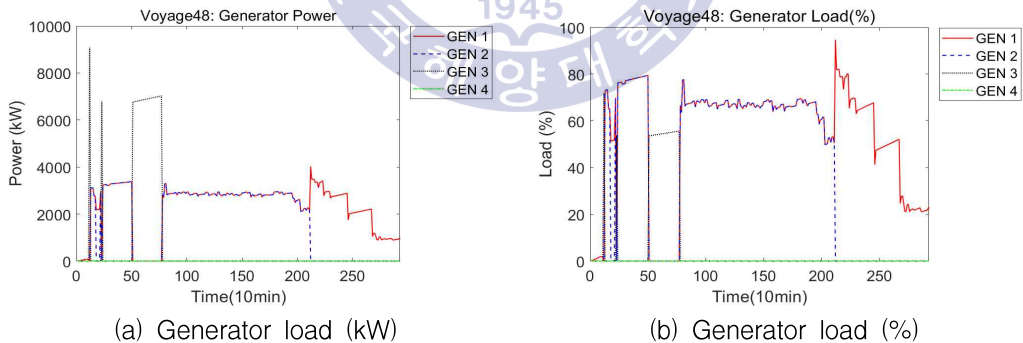


Fig. 55 Generator load controlled by LCS of voyage 48

Fig. 55를 통해 발전기가 60~80 % 부하율에서 주로 운용됨을 확인할 수 있다. 50 % 부하율에서 지속적으로 발전기 부하율을 높이다가 800분 이후에는 부하에 따라 발전기 부하율이 따라가는 것을 확인할 수 있다.

(4) 배터리

- 전력관리시스템

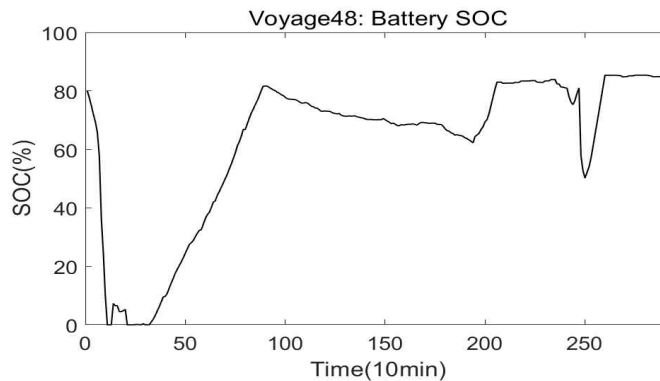


Fig. 56 Battery SOC controlled by PMS of voyage 48

Fig. 56은 전력관리시스템 단독제어 시 배터리의 SOC 변화를 나타낸다.

- 부하제어시스템

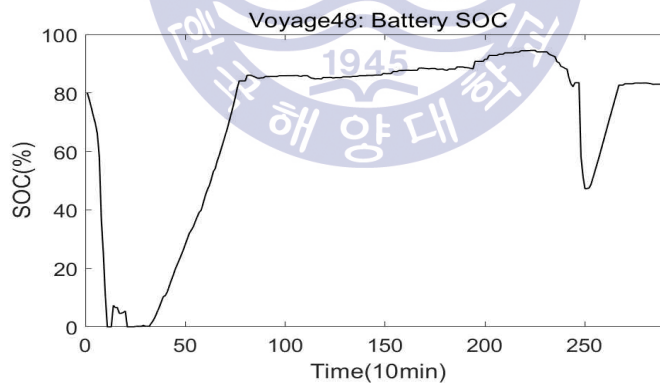


Fig. 57 Battery SOC controlled by LCS of voyage 48

Fig. 57은 부하제어 알고리즘으로 제어 시 배터리 SOC 변화를 나타낸다. 전력관리시스템 보다 빠르게 충전되지만, 충전이 완료되어 부하 변동에 따른 배터리 충·방전양이 줄어들었다.

5.2.4 항차 50에 대한 시뮬레이션 결과

(1) 부하 시나리오

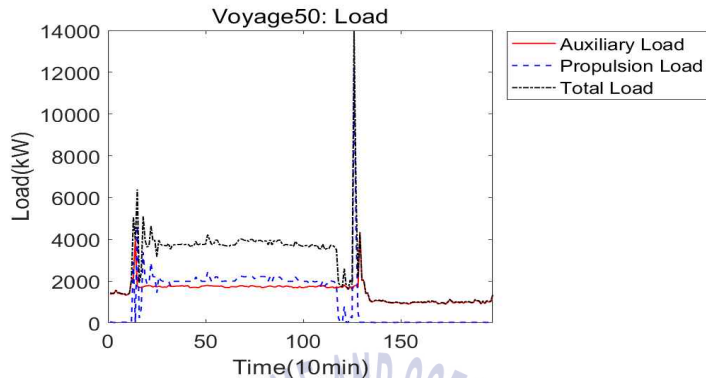


Fig. 58 Load scenario of voyage 50

Fig. 58은 부하제어 시뮬레이션 프로그램에 입력되는 항차 50에 대한 부하시나리오를 나타낸다. 1,250분 근처에서 높은 부하가 발생하였다.

(2) 부하-발전기-배터리

- 전력관리시스템

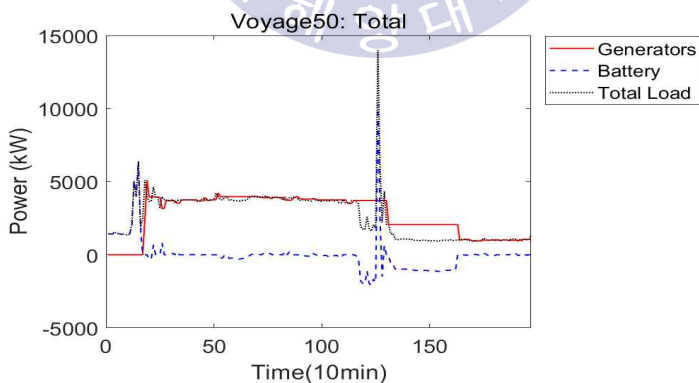


Fig. 59 Total load controlled by PMS of voyage 50

Fig. 59는 전력관리시스템 단독 제어할 때의 발전기 및 배터리 부하 변화를 나타낸다. 크게 변동하는 부하에 대해서 배터리가 부담하는 것을 확인할 수 있다.

- 부하제어시스템

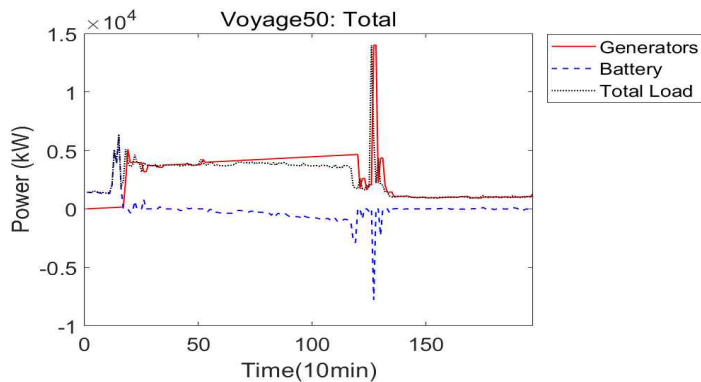


Fig. 60 Total load controlled by LCS of voyage 50

시뮬레이션 결과가 전력관리시스템 단독 제어와 유사하게 나타나며, Fig. 60에서 펄스부하 발생 시 발전기와 배터리가 함께 부담하는 것을 확인할 수 있다. 또한 300분에서 1,350분까지 지속적으로 발전기 부하율을 높이고 있다.

(3) 발전기

- 전력관리시스템

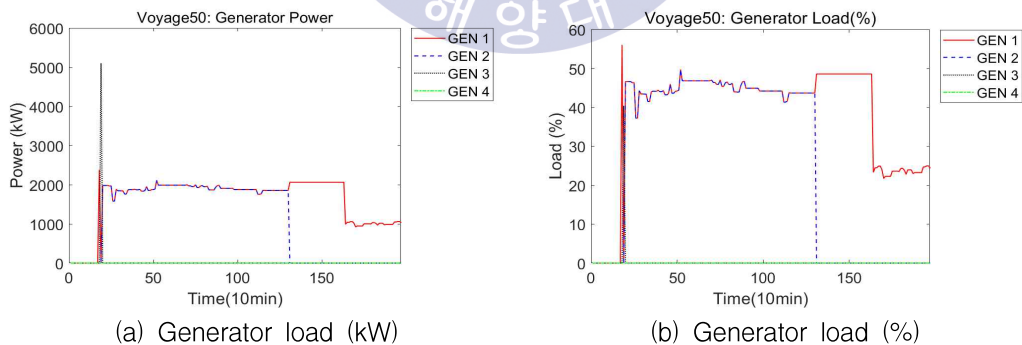


Fig. 61 Generator load controlled by PMS of voyage 50

Fig. 61은 전력관리시스템 단독 제어의 경우, 발전기 부하를 나타낸다. 40~50 % 사이의 부하로 주로 운용되었다.

- 부하제어시스템

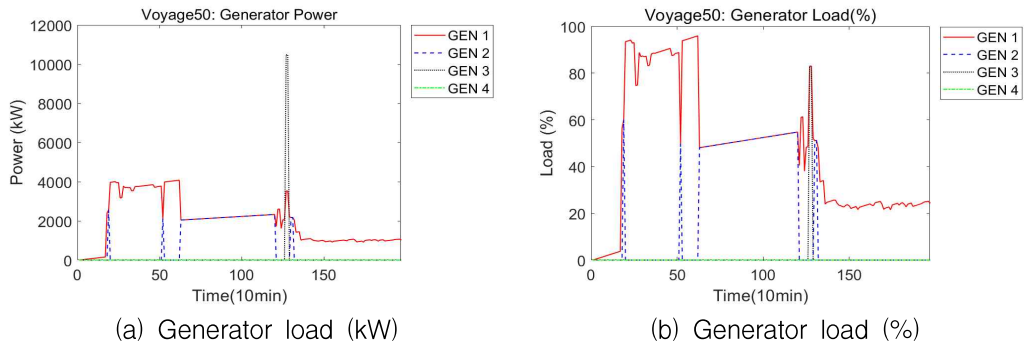


Fig. 62 Generator load controlled by LCS of voyage 50

Fig. 62는 부하제어시스템 제어의 경우 발전기 부하율을 나타낸다. 200~600분까지는 발전기 부하율이 80~90 %로 운용되었고, 600분 이후에는 40~50 %로 운용되었으며 이 구간에서는 발전기 부하율을 높여가는 것을 확인할 수 있다. 1,400분 이후에는 충전이 완료되어 발전기가 부하를 부담한다.

(4) 배터리

- 전력관리시스템

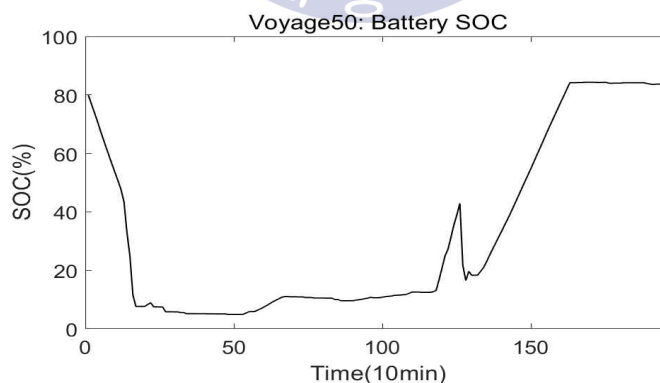


Fig. 63 Battery SOC controlled by PMS of voyage 50

Fig. 63은 전력관리시스템 단독 제어의 경우, 배터리 SOC 변화를 나타낸다.

- 부하제어시스템

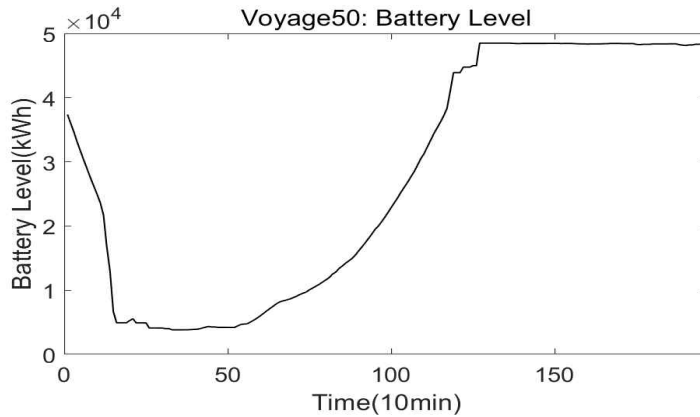


Fig. 64 Battery SOC controlled by LCS of voyage 50

Fig. 64는 부하제어 알고리즘 적용 시 배터리 SOC 변화를 나타내고 있다. 전력관리시스템 단독제어보다 완만한 충전 곡선을 보인다.

5.2.5 항차 51에 대한 시뮬레이션 결과

(1) 부하 시나리오

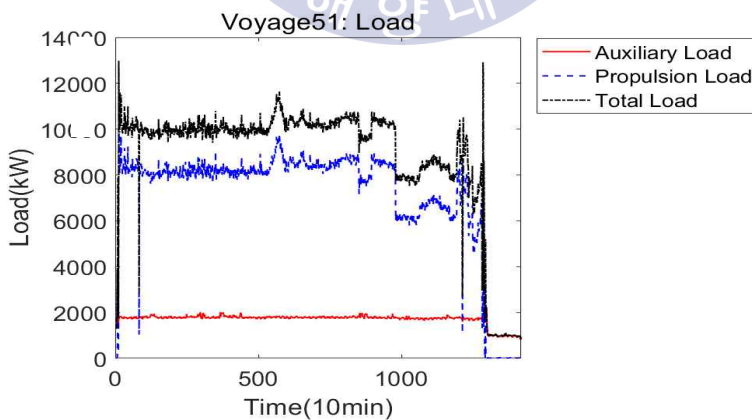


Fig. 65 Load scenario of voyage 51

Fig. 65는 항차 51에 대한 부하 시나리오를 나타낸다.

(2) 부하-발전기-배터리

- 전력관리시스템

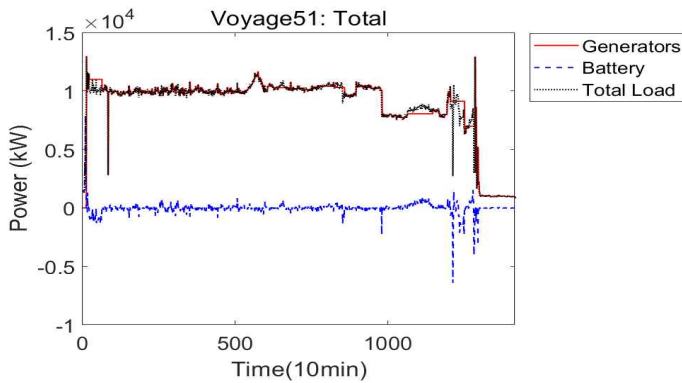


Fig. 66 Total load controlled by PMS of voyage 51

Fig. 66은 항차 51에 대한 전력관리시스템의 발전기, 배터리 운용을 나타낸다. 항해 전반에서 발전기 및 배터리를 함께 운용하였다.

- 부하제어시스템

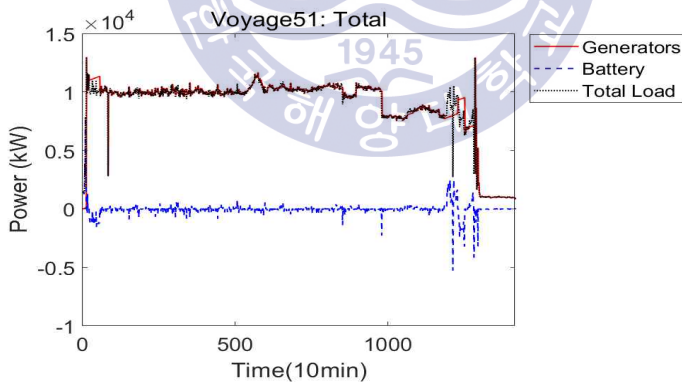


Fig. 67 Total load controlled by LCS of voyage 51

Fig. 67로부터 9,000 분까지 발전기와 배터리가 함께 운용되었으나, 이후 배터리 충전이 완료되면서 발전기 부하가 전체 부하를 따라가는 것을 확인할 수 있다.

(3) 발전기

- 전력관리시스템

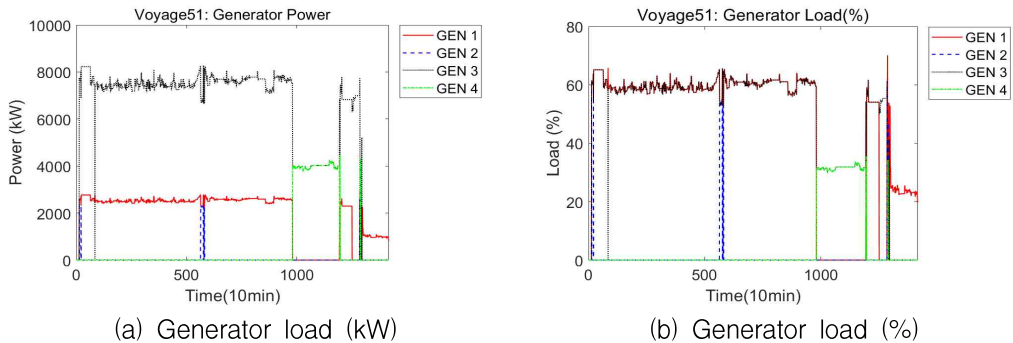


Fig. 68 Generator load controlled by PMS of voyage 51

Fig. 68에서 전력관리시스템 단독 운전의 경우, 10,000분까지 발전기 부하율이 60 % 근처에서 운용됨을 확인할 수 있다.

- 부하제어시스템

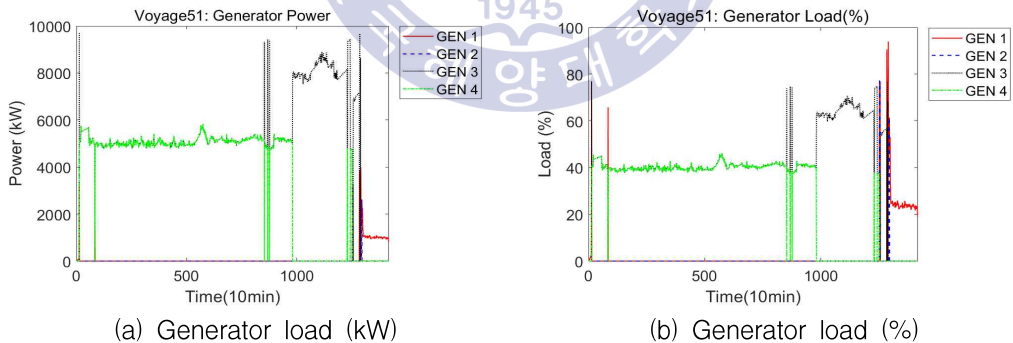


Fig. 69 Generator load controlled by LCS of voyage 51

Fig. 69에서 부하제어시스템 제어를 나타낸다. 4번 발전기는 40 % 부하율에서 운용되고, 1번 발전기 또는 3번 발전기가 60~70 % 부하율에서 간헐적으로 운용되었다.

(4) 배터리

- 전력관리시스템

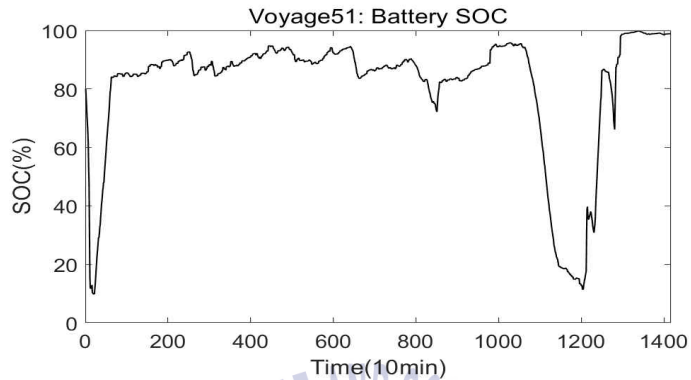


Fig. 70 Battery SOC controlled by PMS of voyage 51

Fig. 70은 전력관리시스템 제어에 따른 배터리 SOC 변화를 나타낸다. 발전기 부하에 따라 충·방전을 반복한다.

- 부하제어시스템

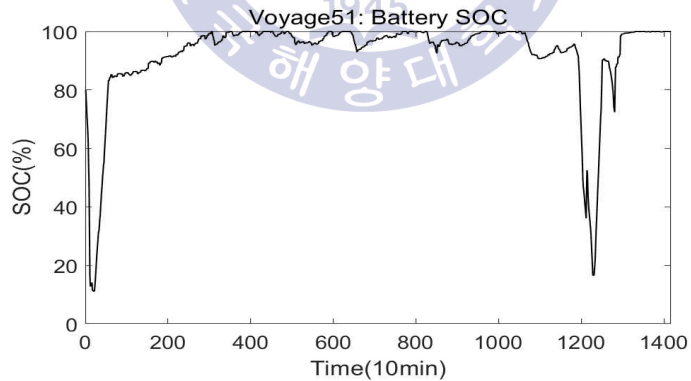


Fig. 71 Battery SOC controlled by LCS of voyage 51

Fig. 71은 부하제어 알고리즘에 따라 제어된 배터리의 SOC 변화를 나타내고 있다.

5.3 시뮬레이션 결과 분석

Fig. 72 및 Fig. 73, Table 21은 시뮬레이션을 통해 도출한 항차별 배터리 잔량 및 연료 소비량을 나타낸 것이다. 부하제어 알고리즘으로 제어된 시스템이 더 많은 배터리 잔량을 확보하였으며, 낮은 연료 소비량을 보인 것을 확인할 수 있다.

일부 항차에 대해서는 전력관리시스템이 더 낮은 연료 소비량을 보이는 경우가 있다. 이는 부하제어 알고리즘이 시스템의 에너지유연성을 판단한 결과, 발전기 부하율을 높여 배터리를 충전하는 경우가 많았기 때문으로, 이로 인해 배터리가 빠르게 완충 상태에 도달하면서 부하 변동 부담 기능을 적게 활용하였기 때문이다. 배터리의 빠른 충전은 선박의 입출항 시 배터리 활용 빈도를 높여 배기가스를 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 시뮬레이션 결과와 같이 부하 변동 부담 기능을 적게 활용하게 되는 것이 단점으로 작용하며 이에 대한 개선이 필요할 것으로 보인다.

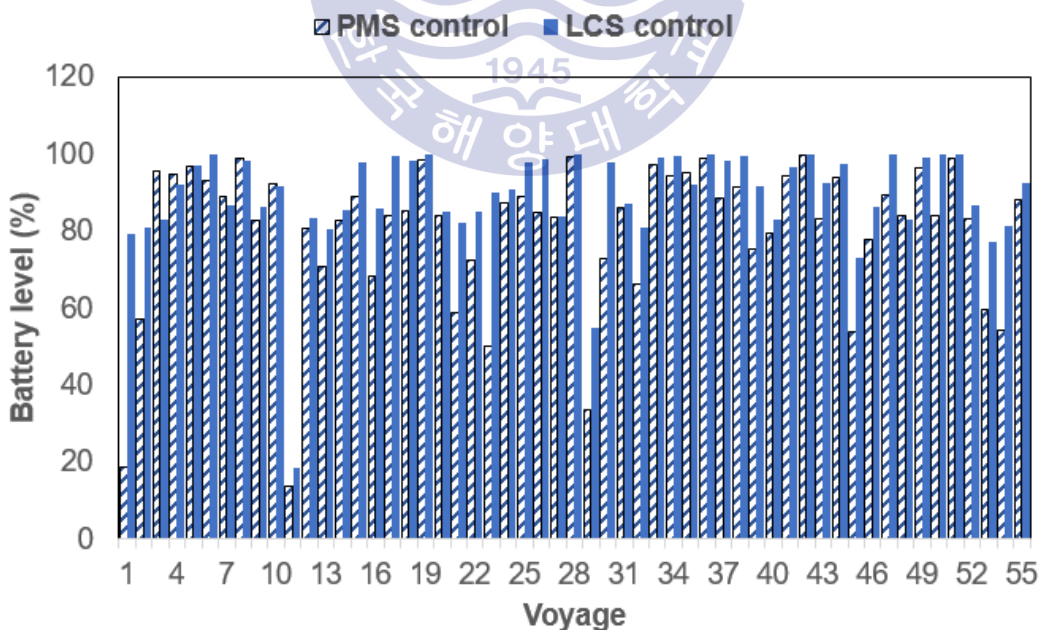


Fig. 72 Battery level of result of simulation

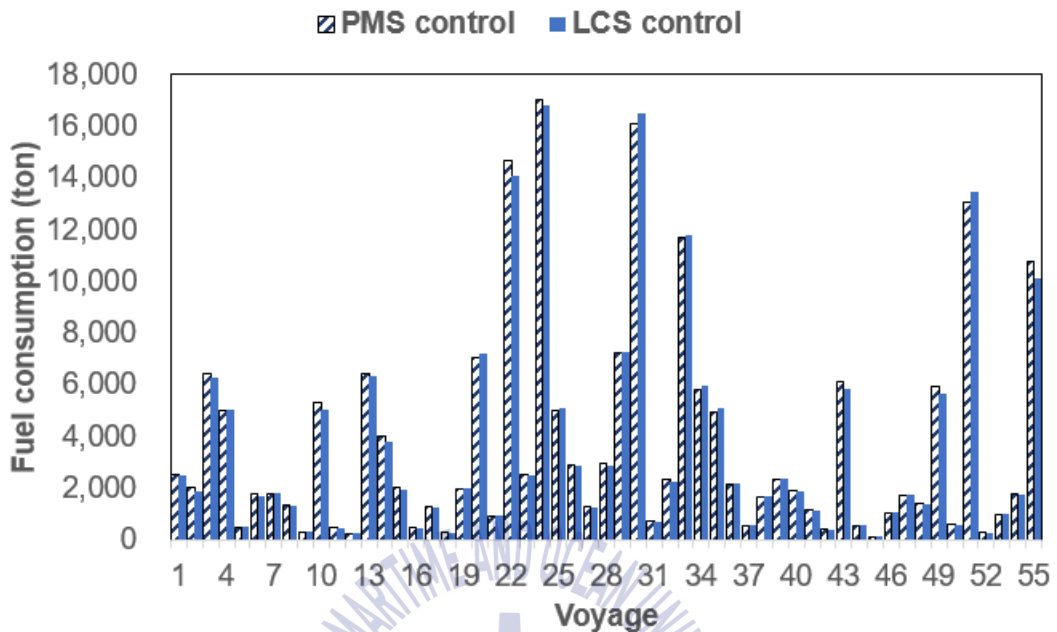


Fig. 73 Fuel consumption of result of simulation

Table 21 Results of fuel consumption and battery level

제어 조건	전력관리시스템 단독 제어	부하제어시스템을 통한 제어	전력관리시스템 단독 제어 결과 대비 부하제어시스템을 통한 제어 결과의 비
항차별 평균 연료 소모율	3,672.69 ton	3,635.30 ton	98.98 %
최종배터리 레벨	80.34%	89.15 %	110.97 %

시뮬레이션 결과 전력관리시스템 대비 부하제어시스템이 항차별 연료를 98.98 % 소비하였고, 배터리의 경우 전력관리시스템 대비 110.97 % 충전되었다. 부하제어시스템으로 제어될 경우, 전력관리시스템 단독 제어와 비교하여 1.01%의 연료소비율 감소와 10.97%의 배터리 용량 확보를 확인할 수 있었다. 부하제어시스템으로 제어한 경우가 전력관리시스템으로 제어한 경우보다 유의미한 연료 절감율을 보인 것은 아니었지만, 동량의 연료 절감율 대비 배터리 충전율이 더 높음을 확인할 수 있었다.

제 6 장 결론

선박의 배출가스에 대한 규제가 강화되고, 4차 산업혁명에 따라 선박의 자동화에 대한 관심이 높아지면서 전기추진시스템에 대한 연구개발이 지속적으로 늘어나고 있다. 기존의 전기추진시스템은 여객선, 해양플랜트, 함정 등의 특수선에 한정되어 적용되어 왔지만, 전기추진시스템의 장점인 배출가스 저감, 모니터링 및 제어가 용이하여 자동화에 유리하다는 점으로 인해 향후 상선에도 적용될 것으로 예상된다. 전기추진시스템이 선박에 적용되면, 추진시스템과 전력시스템이 통합되면서 에너지의 활용 범위가 늘어나게 된다. 따라서 에너지의 효율성을 높이기 위해서 선박 내 전력에너지의 모니터링 및 운용이 중요해진다.

본 연구에서는 전기추진시스템의 발전기-배터리 하이브리드 전력원에 대하여 에너지 관리를 수행하는 부하제어 알고리즘을 제안하였다. 전기추진시스템을 대상으로 하는 부하관리 알고리즘을 상선에 적용할 시 에너지 절감 및 에너지효율성이 어떻게 변화하는지 확인하기 위하여 전기추진시스템이 적용된 가상의 컨테이너선을 설계하였다. 대상선박은 6,800 TEU의 컨테이너선으로, 부하분석을 통해 발전기 용량 및 배터리 용량을 설계하여 4,250 kW 발전기 2대, 12,650 kW 발전기 2대와 48,500 kWh 배터리 시스템으로 구성되는 가상의 전기추진시스템을 제안하였다.

부하제어 알고리즘은 데이터 수집을 통한 모드설정, 모드에 따른 요구 전력여유율 결정, 에너지유연성 및 에너지효율성 계산, 계산된 에너지 계수를 기반으로 발전기와 배터리 간의 부하분배 수행으로 구성된다. 모드 설정을 수행하기 위해 자기조직화지도를 이용하여 선박의 부하 데이터와 선속 등을 분석하였고, 부하 운용 특성에 따라 부하제어 알고리즘이 갖는 전력여유율을 다르게 설정할 수 있도록 하였다. 부하제어 알고리즘은 에너지효율성과 에너지유연성을 바탕으로 발전기의 부하율 제어와 배터리의 충·방전 제어를 통해 발전시스템의 에너지 운용을 제어할 수 있게 하였다.

마지막으로 부하제어 알고리즘의 성능을 확인하기 위해서 MATLAB Simulink를 통해 발전기 4대 및 전력관리시스템, 배터리 및 배터리관리시스템, 배전반, 추진부하, 보조부하, 부하제어시스템으로 구성된 전기추진시스템을 모델링하였다. 전력 운용 효율성을 수치적으로 확인하기 위하여 전력관리시스템 운전 시와 부하제어시스템 운전 시에 대해서 총 55항차의 부하시나리오를 적용한 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과, 전력관리시스템과 비교하여 부하제어시스템이 1.01%의 연료소비율 감소와 10.97%의 배터리 잔량을 더 확보함을 확인할 수 있었다. 부하제어 알고리즘은 보다 적은 연료소비율에 대해서 배터리에 저장한 전력량은 보다 높일 수 있는 알고리즘이다. 배터리에 전력을 저장함으로써 배출가스 없이 사용가능한 전력을 미리 확보해둘 수 있고, 이 전력은 배출가스 규제 구역에서 입출항 시 배터리 활용을 보다 높일 수 있다는 점에서 유리한 에너지운용 알고리즘임을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과는 전기추진시스템의 선박 내 에너지 통합관리를 위한 에너지관리시스템 연구에 활용이 가능하며, 추후에는 부하 데이터 처리 방법과 에너지 계수 활용 메커니즘을 시스템에 맞춰 보완함으로써 친환경 및 자동화 선박의 에너지 관리시스템 연구에도 활용이 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] 박유상, “해상환경규제 강화에 따른 조선산업 영향”, 이슈브리프, 2018. 1.
- [2] 이호춘, 황진희, 박한선, 류희영, “우리나라 선박 배출 대기오염물질의 체계적 관리방안.” 연구보고서, 한국해양수산개발원 2016. 12.
- [3] 향창호, “자율운항선박, 침체된 해운산업 및 조선 산업의 새로운 성장 동력”, Weekly Report, 한국해양수산개발원, 2018. 2.
- [4] 곽노필, “중국 세계 첫 전기화물선 띄웠다”, 한겨레, 2017. 12.
- [5] “All Electric Ferry to Navigate Norway” Fjords, Business Recorder, 2017. 06.
- [6] 임종관, 전형진, 김태일, 이언경, 김정현, “미래형 선박을 활용한 신해양비즈니스 모델 구축 연구”, 한국해양수산개발원, 2011. 12.
- [7] Perera, Lokukaluge P. and Brage Mo., “Emission control based energy efficiency measures in ship operations.”, Applied Ocean Research 60, 2016.
- [8] 김경화, “온실가스 저감 대응기술 (전기추진)” [Internet] Available from: http://www.shipowners.or.kr/admin/bbs/down.php?code=busan_office&idx=13275&no=2
- [9] Kouzelis and Konstantinos. “Load and flexibility models for distribution rid management.” PhD thesis. Department of Energy Technology, 2015.
- [10] “Diesel-electric Propulsion Plants, A brief guideline how to engineer a diesel-electric propulsion system. Technical article, MAN” [Internet] Available from : <https://marine.mandieselturbo.com/docs/librariesprovider6/marine-broschu>

res/diesel-electric-drives-guideline.pdf

- [11] Hodge, C. G. and D. J. Mattick., “The electric warship II.” Transactions-Institute of Marine Engineers 109, pp. 138~144, 1997.
- [12] “국방·군사시설기준 비상전원설비 설계기준” [Internet] Available from : www.mnd.go.kr/common/download.action?siteId=mnd&fileSeq=I_279195
- [13] Fayyad, Usama, Gregory Piatetsky-Shapiro and Padhraic Smyth. “From data mining to knowledge discovery in databases.” AI magazine vol. 17, no. 3, 1996.
- [14] Mia Louise Westerlund, “Classification with Kohonen self-organizing maps” , Soft Computing, Haskoli Lslands, 2005.
- [15] 허명희. “일반주성분 자기조직화 지도 PC-SOM.” 응용통계연구, vol. 16 no, 2, pp. 321~333, 2003.
- [16] 안현준, 신주영, 정창삼, 허준행, “Self-organizing map을 이용한 강우 지역빈도해석의 지역구분 및 적용성 검토” 한국수자원학회 논문집 vol. 51, no. 5, pp. 383~393, 2018.
- [17] Kouzelis and Konstantinos. “Load and flexibility models for distribution rid management.” PhD thesis. Department of Energy Technology, 2015.
- [18] ÅDNANES, Alf Kåre. “Maritime electrical installations and diesel electric propulsion.” 2003.
- [19] Prenc, Rene, Aleksandar Cuculić, and Ivan Baumgartner. “Advantages of using a DC power system on board ship.” Pomorski zbornik, vol. 52, no. 1, pp. 83~97, 2016.
- [20] Kanellos, Fotis D., Amjad Anvari-Moghaddam, and Josep M. Guerrero. “A cost-effective and emission-aware power management system for ships with integrated full electric propulsion.” Electric Power Systems Research 150, pp. 63~75, 2017.

- [21] Doerry, Norbert. "Electric power load analysis." ASNE Naval Eng. J, vol. 124, no. 4, pp. 45~48, 2012.
- [22] Fernandes, A. M., "Gas turbine control and load sharing of a shipboard power system." , Diss.. West Virginia University Libraries, 2006.
- [23] Apsley, Judith M., et al. "Propulsion drive models for full electric marine propulsion systems." IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 45, no. 2, pp. 676~684, 2009.
- [24] Shagar, Viknash, Shantha Jayasinghe, and Hossein Enshaei. "Effect of load changes on hybrid shipboard power systems and energy storage as a potential solution: A review." Inventions, vol. 2, no. 3, 2017.
- [25] De Breucker, Sven, Eefje Peeters, and Johan Driesen. "Possible applications of plug-in hybrid electric ships." Electric Ship Technologies Symposium, 2009.
- [26] Bø, Torstein I., et al. "Real-time marine vessel and power plant simulation." ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [27] Baldi, Francesco, et al. "Energy and exergy analysis of a cruise ship." Energies, vol. 11, no. 10, 2018.
- [28] Boveri, Alessandro, Federico Silvestro, and Paola Gualeni. "Ship electrical load analysis and power generation optimisation to reduce operational costs." Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference, IEEE, 2016.
- [29] Krčum, Maja, Anita Gudelj, and Vinko Tomas. "Optimal Design of Ship's Hybrid Power System for Efficient Energy." Transactions on maritime science, vol. 7, no. 1, pp. 23-32, 2018.
- [30] Poroseva, Svetlana V., Nathan Lay, and M. Yousuff Hussaini. "Algorithm

Development for Evaluating the IPS Survivability due to its Topology.” Electric Ship Technologies Symposium, IEEE, 2009.

[31] Calfo, R. M., J. A. Fulmer, and J. E. Tessaro. “Generators for use in electric marine ship propulsion systems.” Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE, 2002.

[32] Al-suod, Mahmoud Mohammad Salem, Ushkarenko O. Alexander, and Dorogan I. Olga. “Optimization of the structure of diesel-generator units of ship power system.” International Journal of Advanced Computer Research, vol. 5, no. 18, 2015.

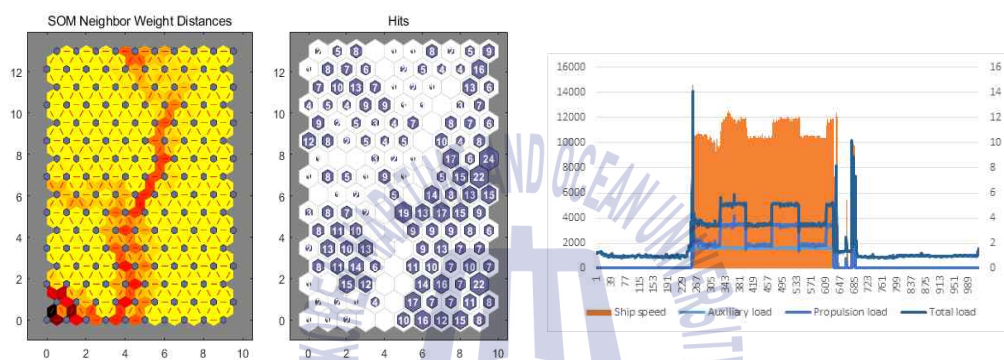
[33] Dedes, Eleftherios K., Dominic A. Hudson, and Stephen R. Turnock. “Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping.” Energy Policy 40, pp.204~218, 2012.

[34] Baldi, F., “Modelling, analysis and optimisation of ship energy systems.” Chalmers University of Technology, 2016.

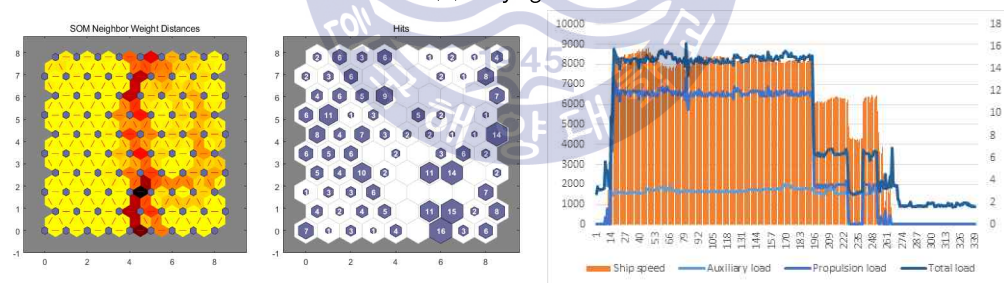
[35] Hyunjun, Ahn, et al. “Assessing applicability of self-organizing map for regional rainfall frequency analysis in South Korea.” 한국수자원학회 논문집, vol. 51, no. 5, pp. 383-393, 2018.

부 록 1 : 항차별 부하에 따른 자기조직화지도 수행 결과

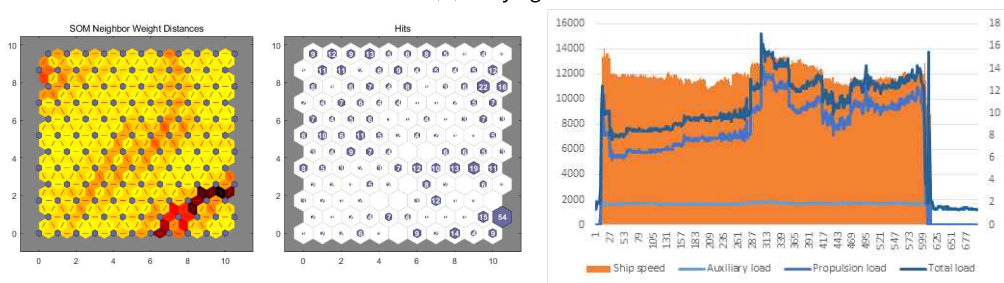
4.2절에서 총 55항차에 대해서 자기조직화지도도를 수행한 결과를 정리하였다. 군집화에 사용한 데이터는 보조부하, 추진부하, 전체부하, 보조부하 비율, 추진부하 비율, 선속이다. 다음은 항차별 자기조직화지도도 수행 결과를 나타낸다.



(a) voyage 1

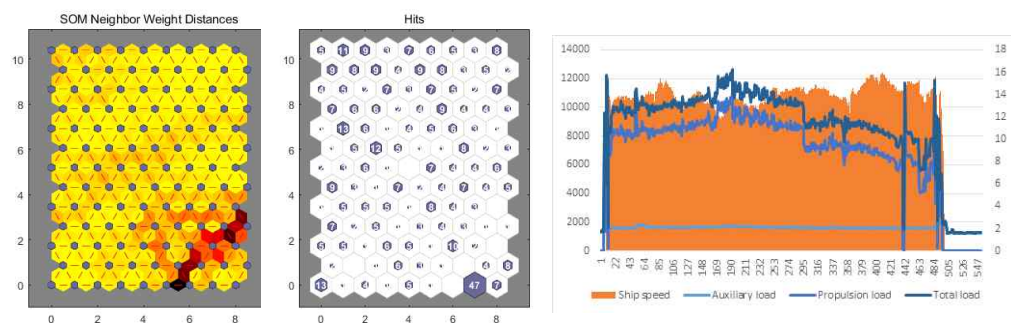


(b) voyage 2

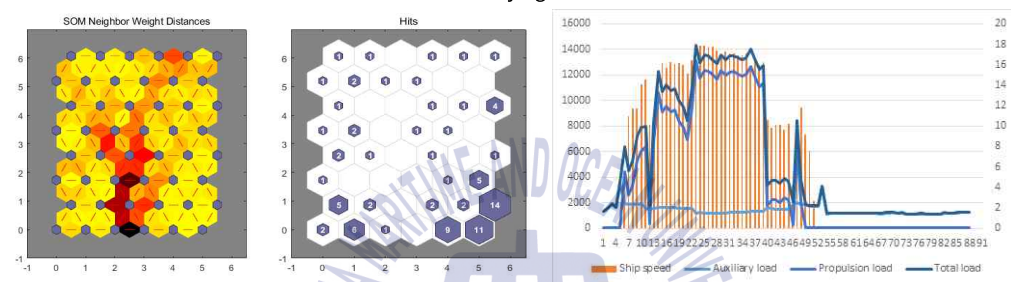


(c) voyage 3

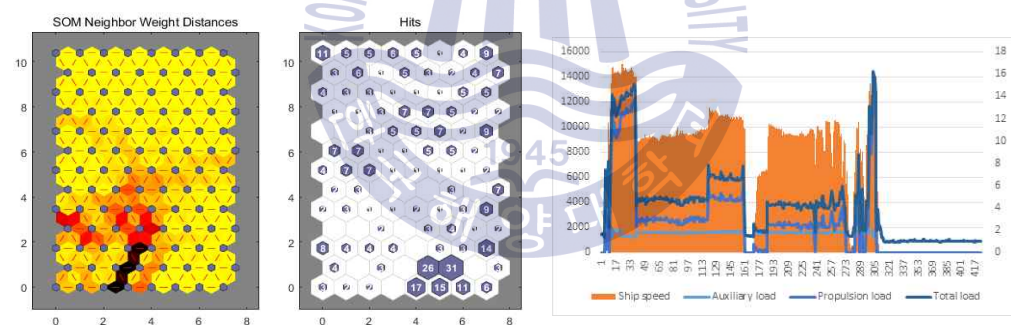
Fig. 74 Results of SOM(1)



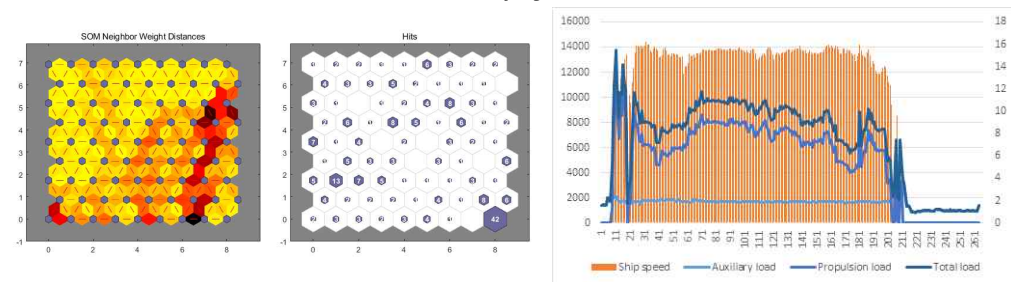
(d) voyage 4



(e) voyage 5

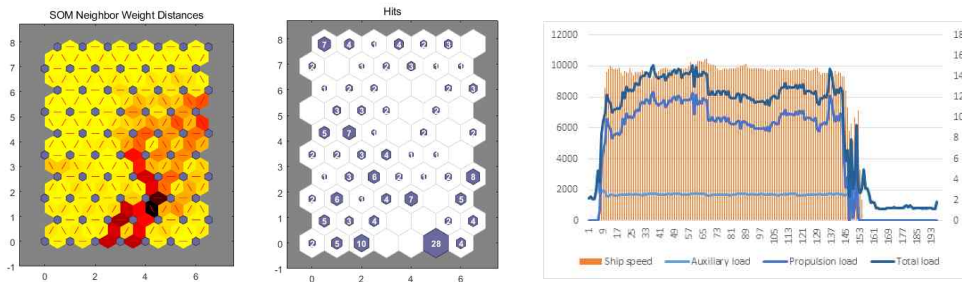


(f) voyage 6

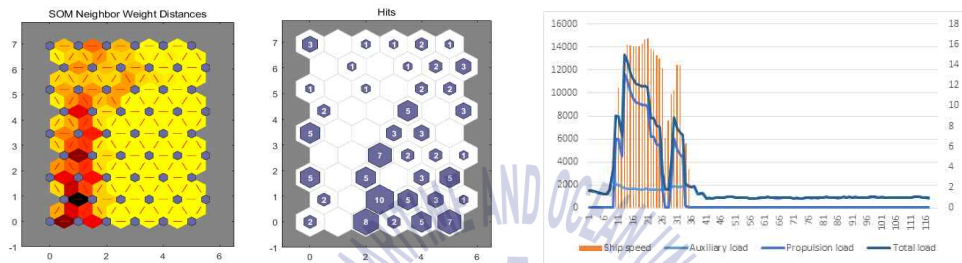


(g) voyage 7

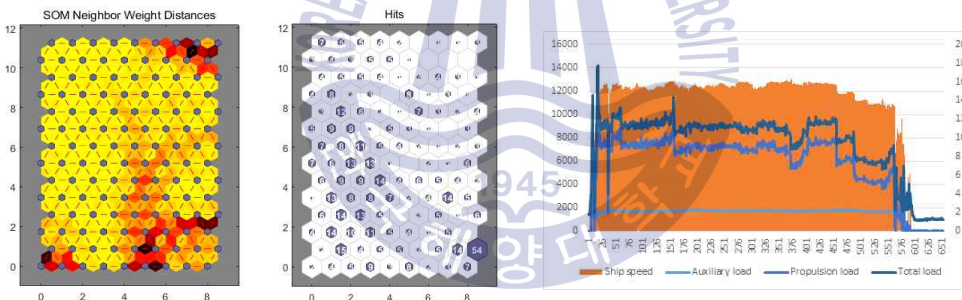
Fig. 75 Results of SOM(2)



(h) voyage 8



(i) voyage 9

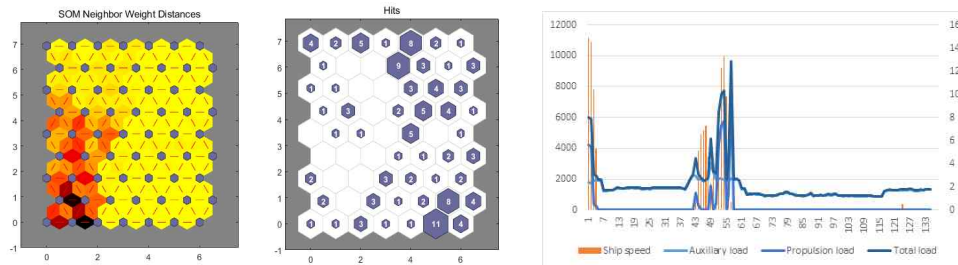


(j) voyage 10

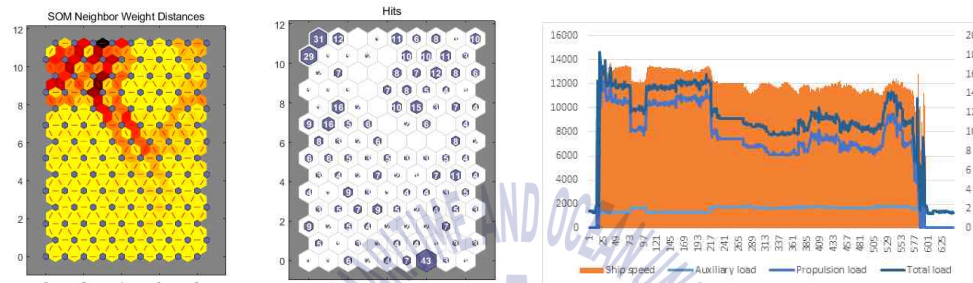


(k) voyage 11

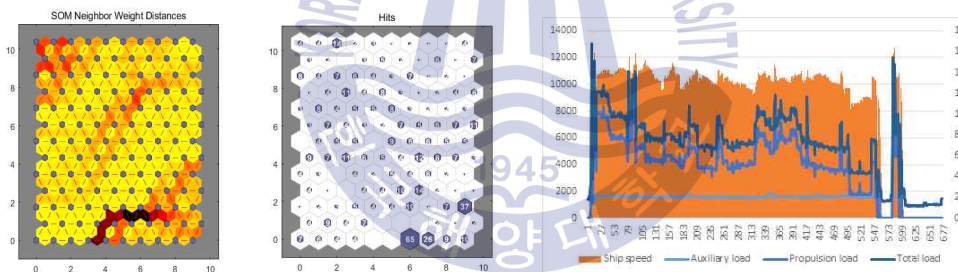
Fig. 76 Results of SOM(3)



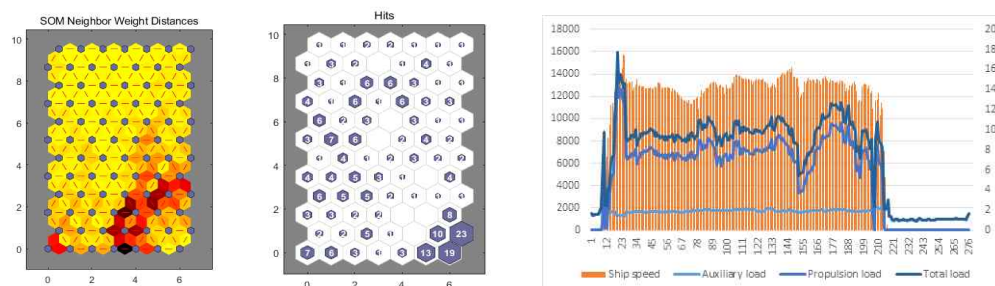
(l) voyage 12



(m) voyage 13

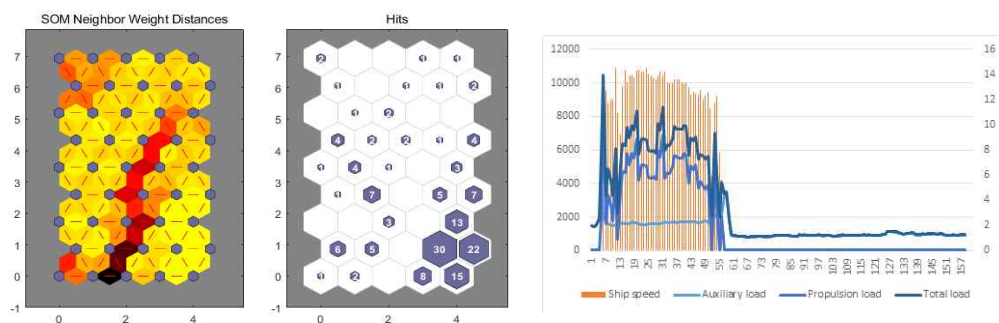


(n) voyage 14

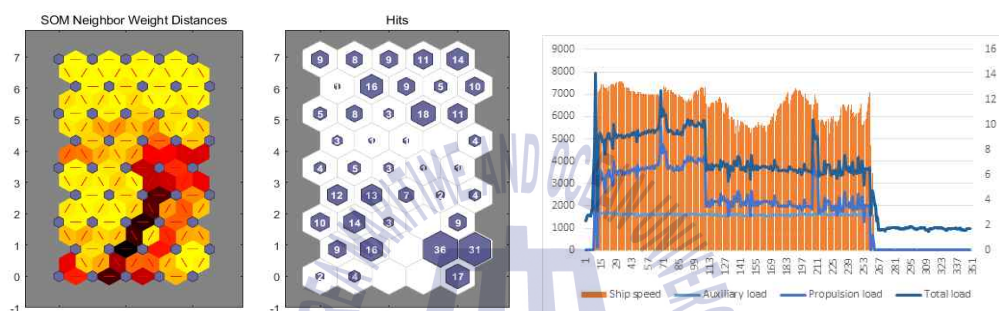


(o) voyage 15

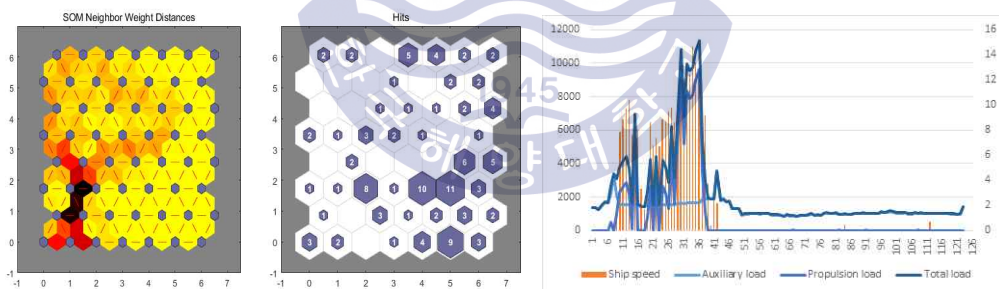
Fig. 77 Results of SOM(4)



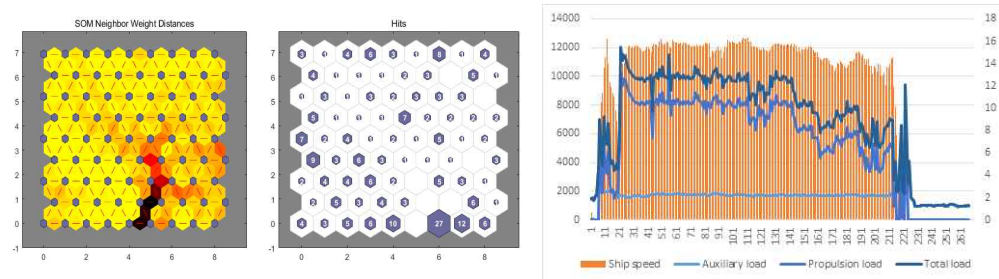
(p) voyage 16



(q) voyage 17

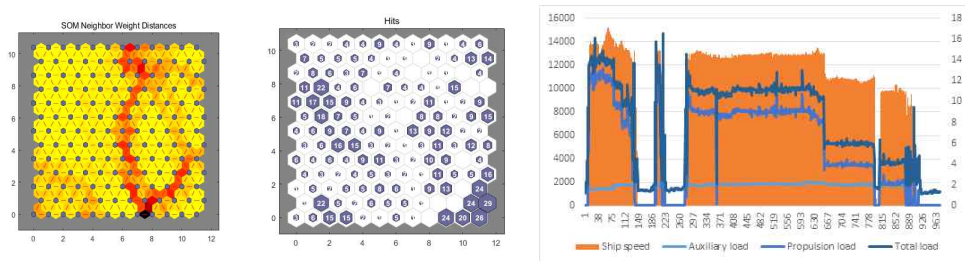


(r) voyage 18

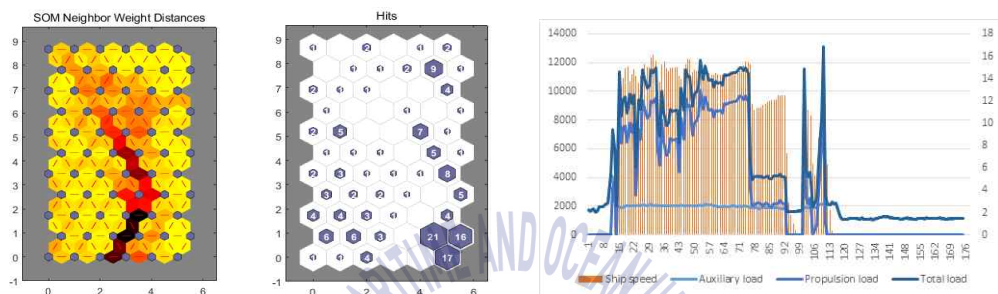


(s) voyage 19

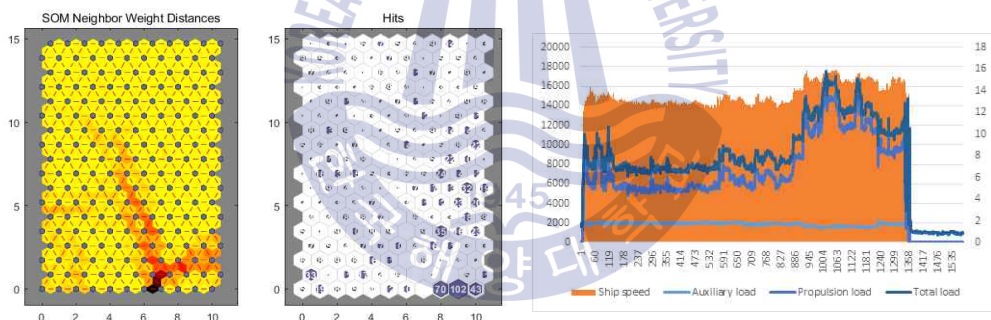
Fig. 78 Results of SOM(5)



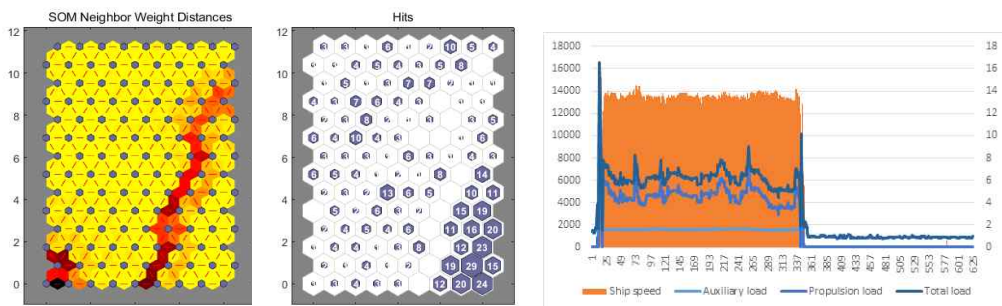
(t) voyage 20



(u) voyage 21

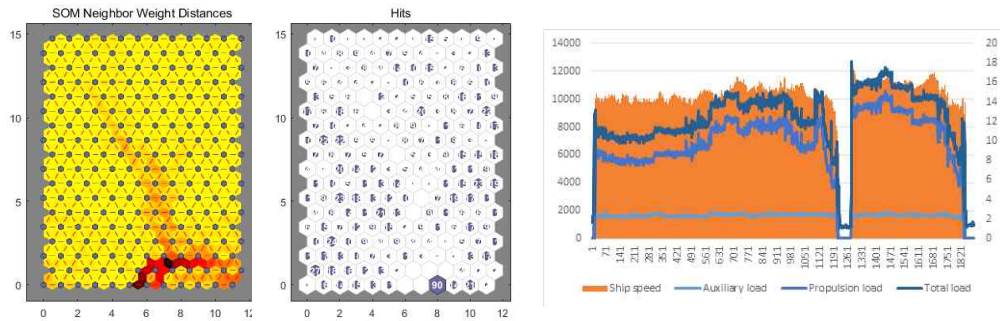


(v) voyage 22

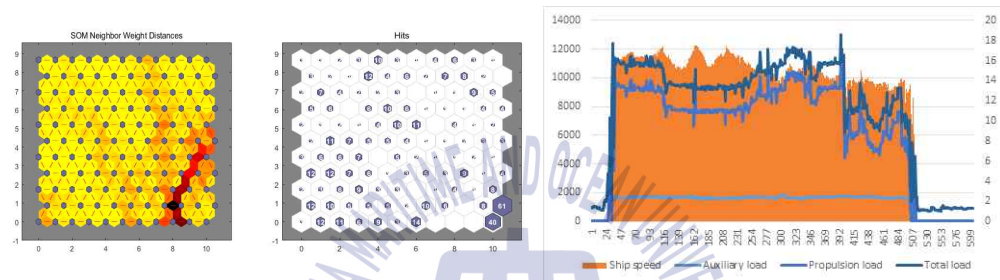


(w) voyage 23

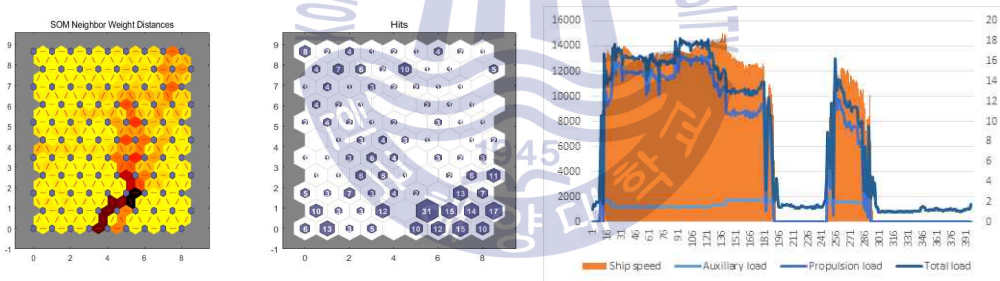
Fig. 79 Results of SOM(6)



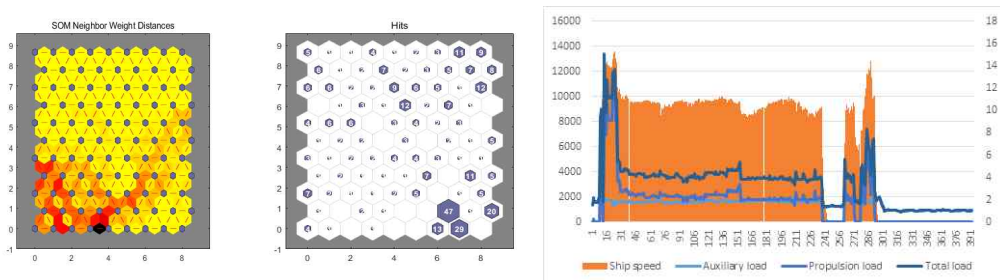
(x) voyage 24



(y) voyage 25

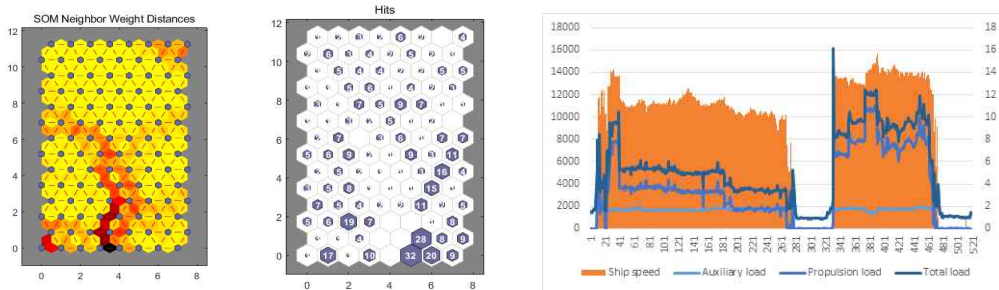


(z) voyage 26

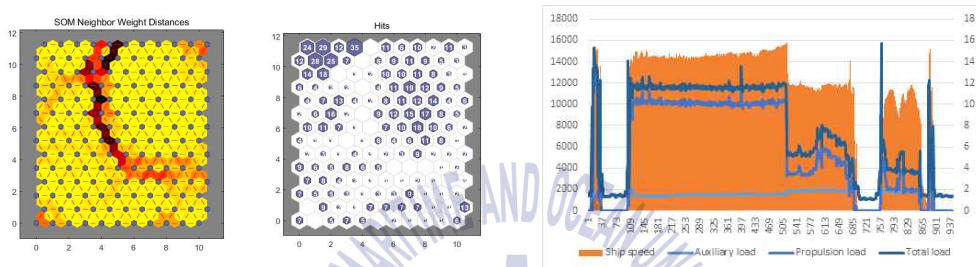


(aa) voyage 27

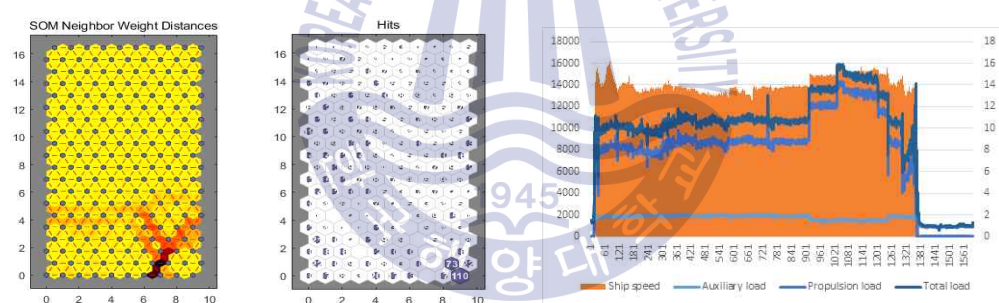
Fig. 80 Results of SOM(7)



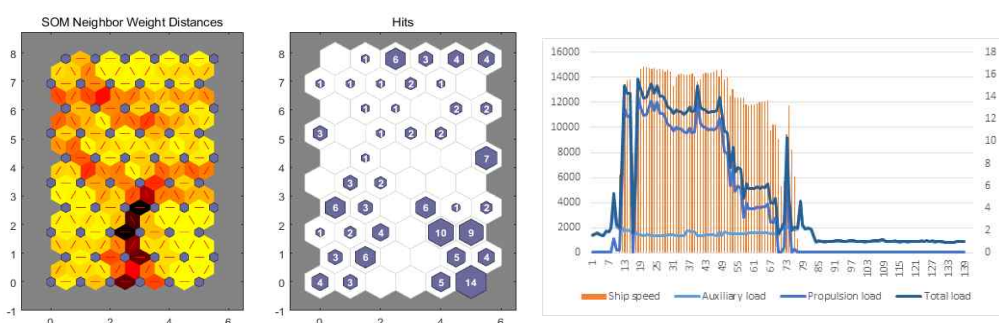
(ab) voyage 28



(ac) voyage 29

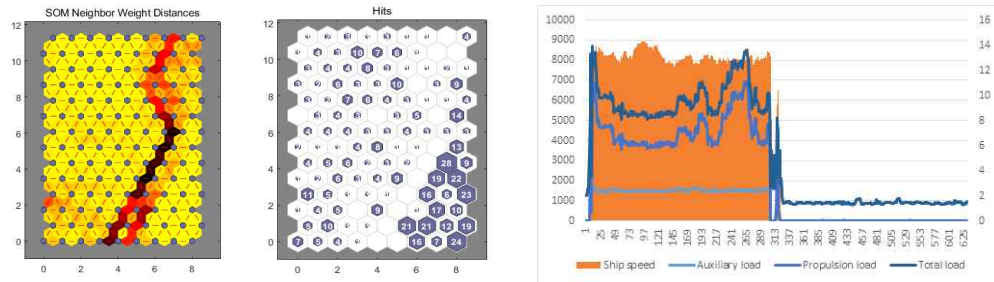


(ad) voyage 30

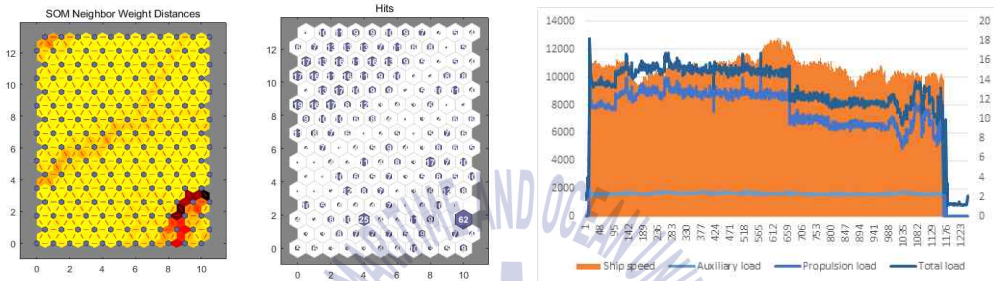


(ae) voyage 31

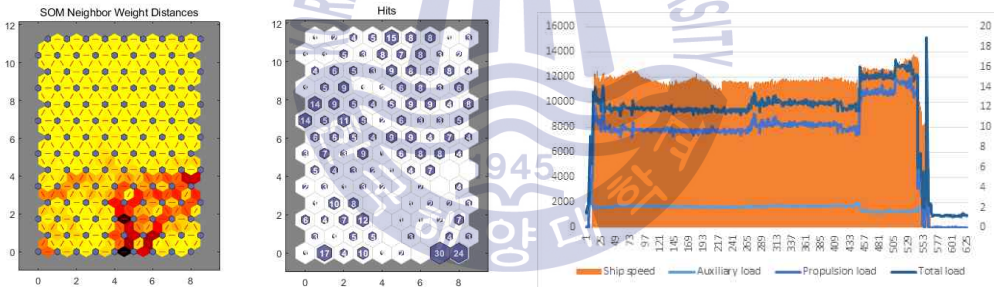
Fig. 81 Results of SOM(8)



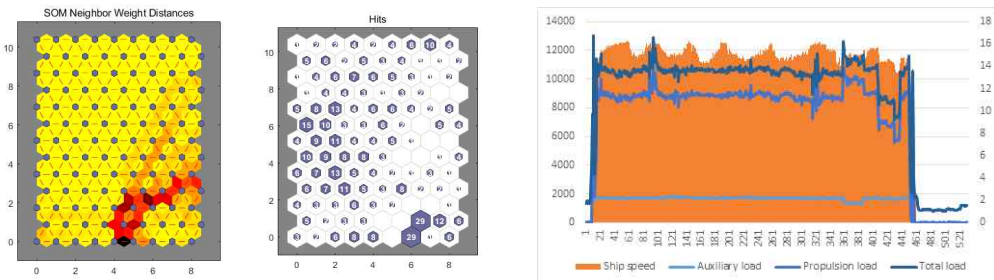
(af) voyage 32



(ag) voyage 33

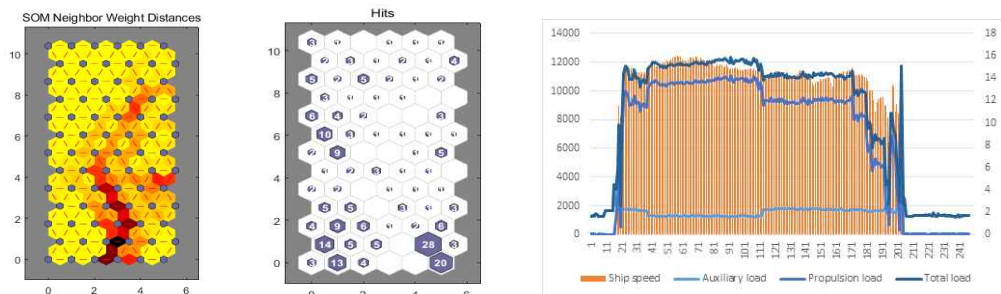


(ah) voyage 34

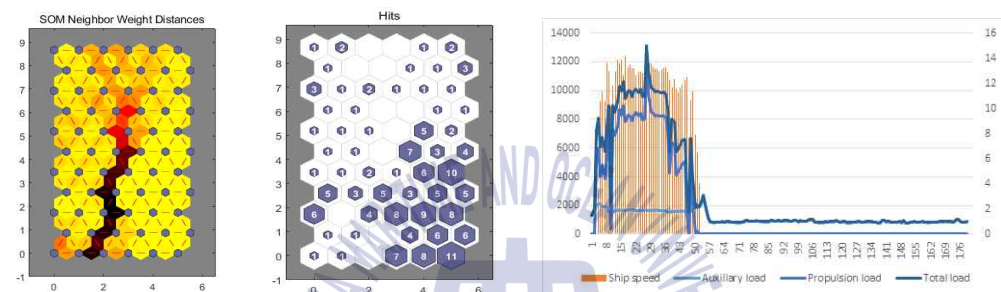


(ai) voyage 35

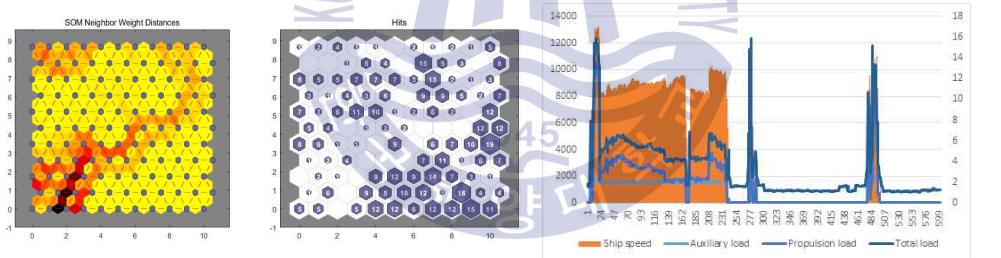
Fig. 82 Results of SOM(9)



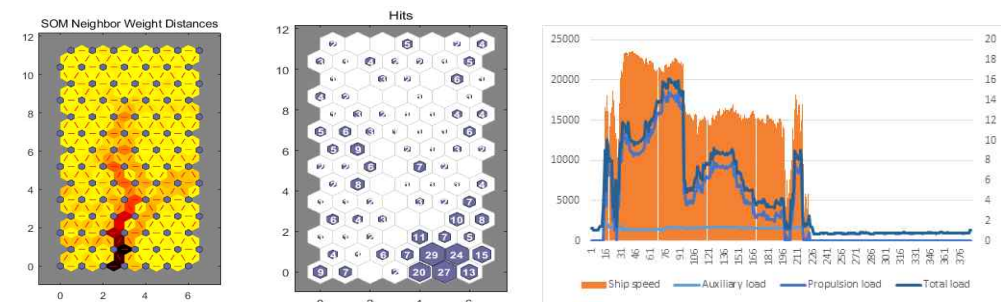
(aj) voyage 36



(ak) voyage 37

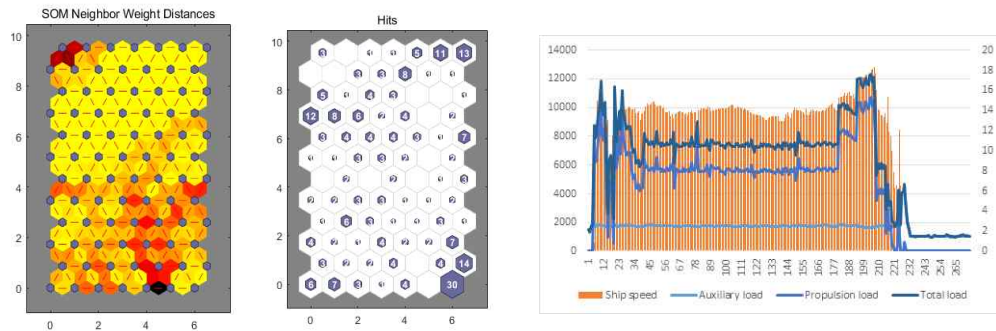


(al) voyage 38

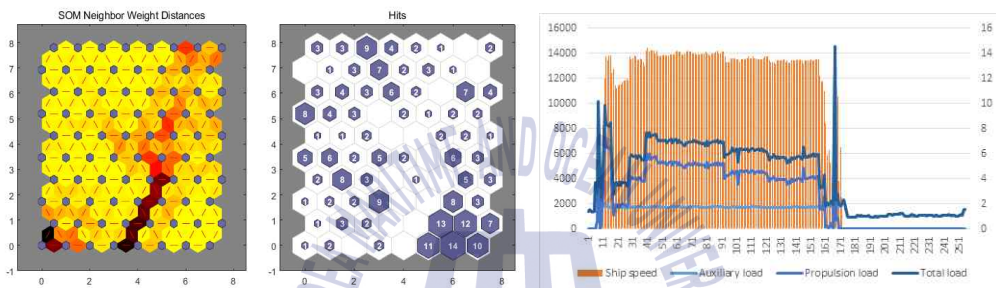


(am) voyage 39

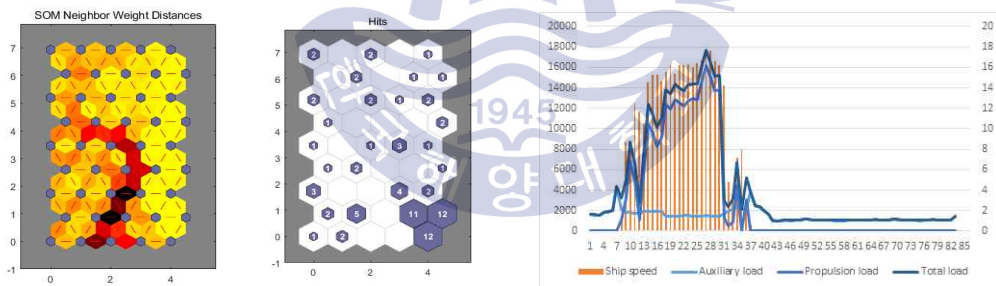
Fig. 83 Results of SOM(10)



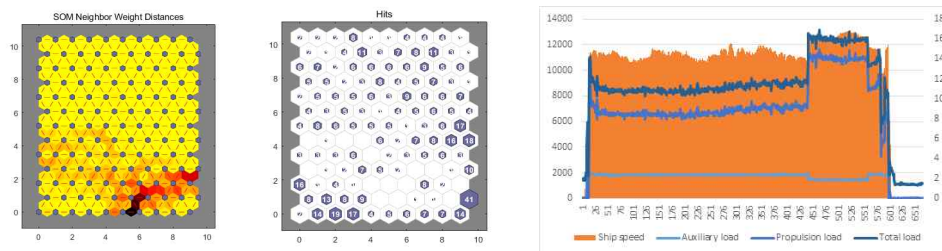
(an) voyage 40



(ao) voyage 41

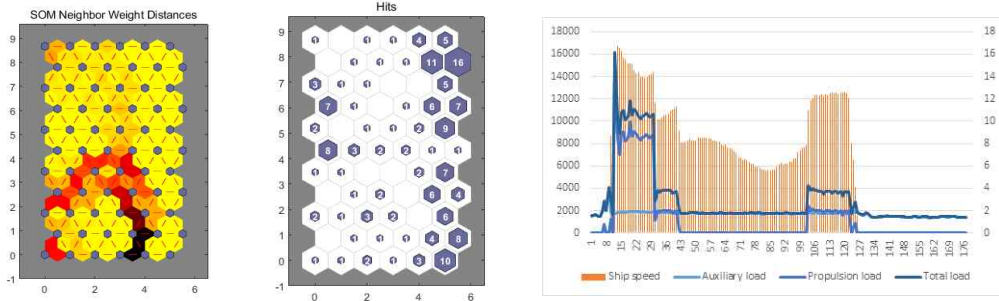


(ap) voyage 42

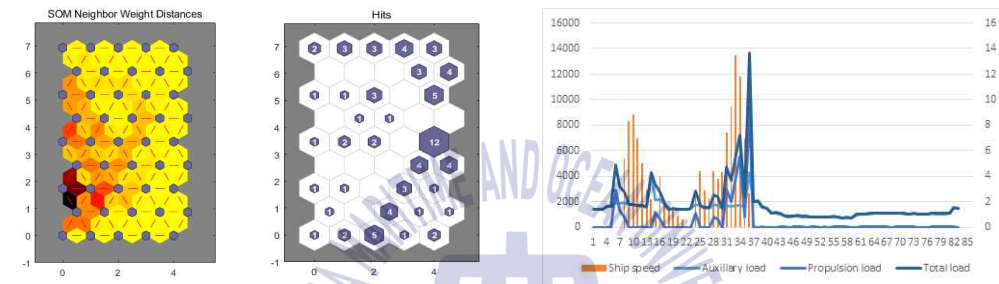


(aq) voyage 43

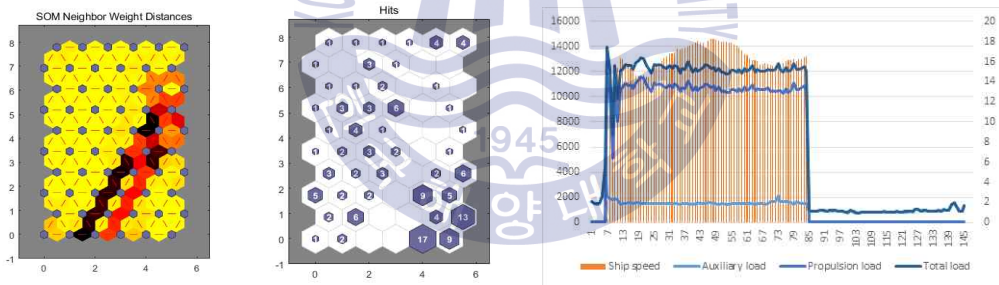
Fig. 84 Results of SOM(11)



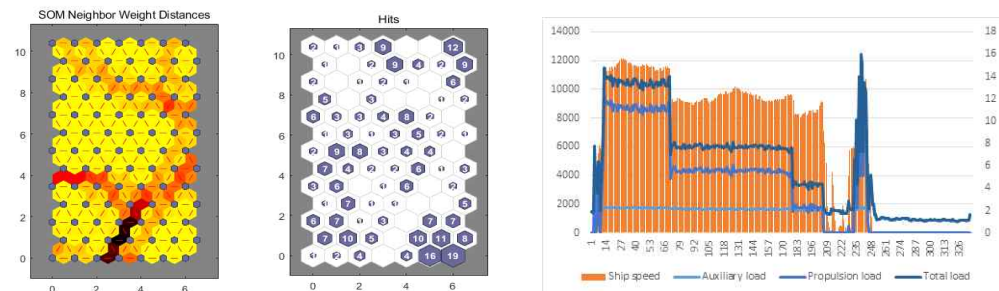
(ar) voyage 44



(as) voyage 45

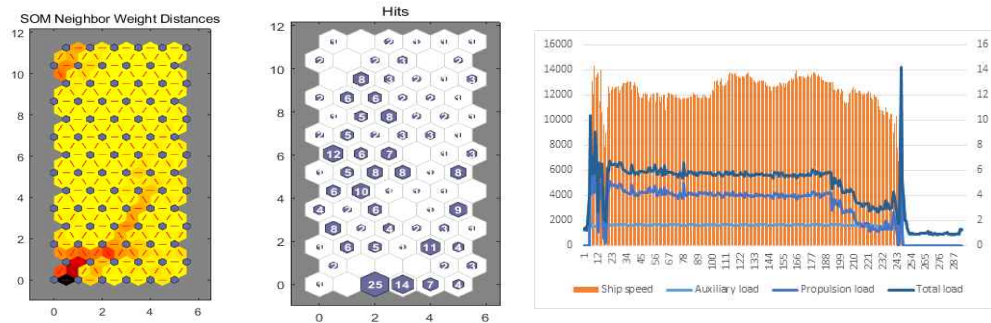


(at) voyage 46

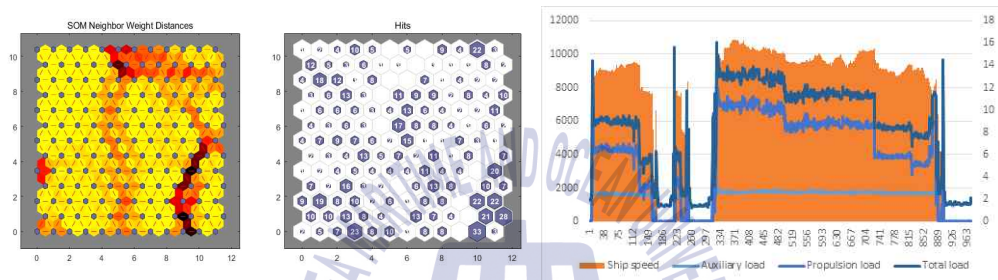


(au) voyage 47

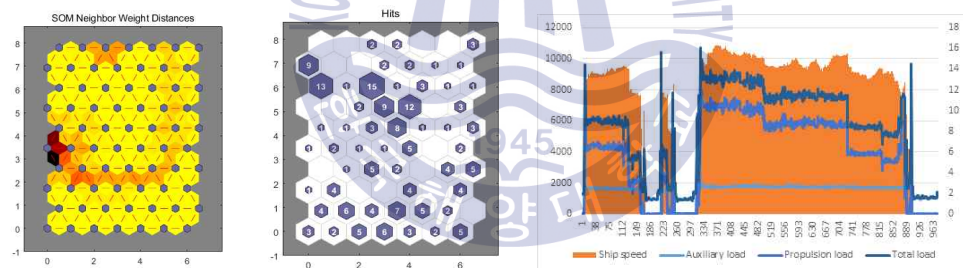
Fig. 85 Results of SOM(12)



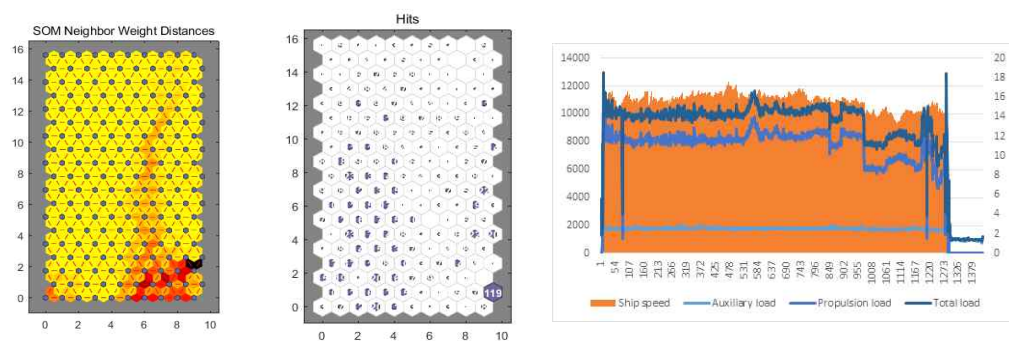
(av) voyage 48



(aw) voyage 49

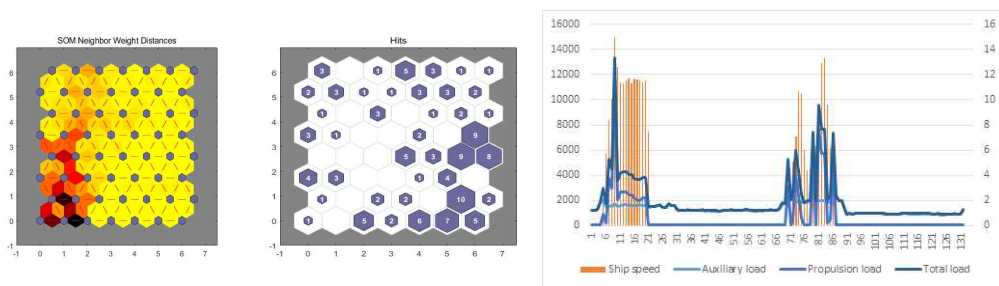


(ax) voyage 50

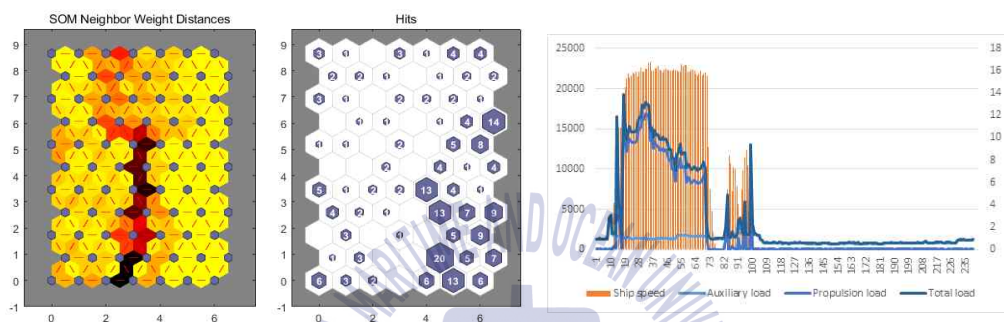


(ay) voyage 51

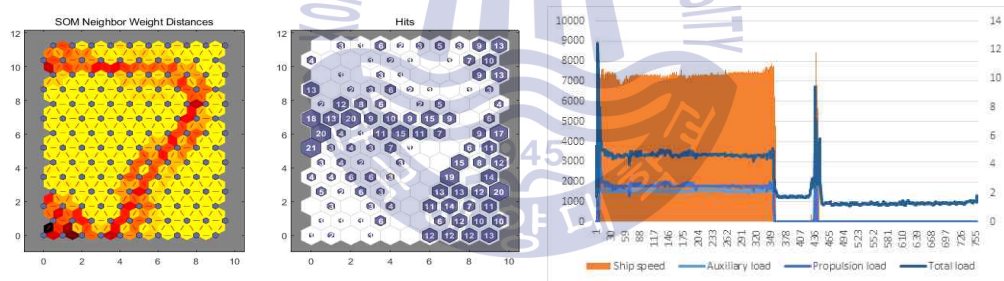
Fig. 86 Results of SOM(13)



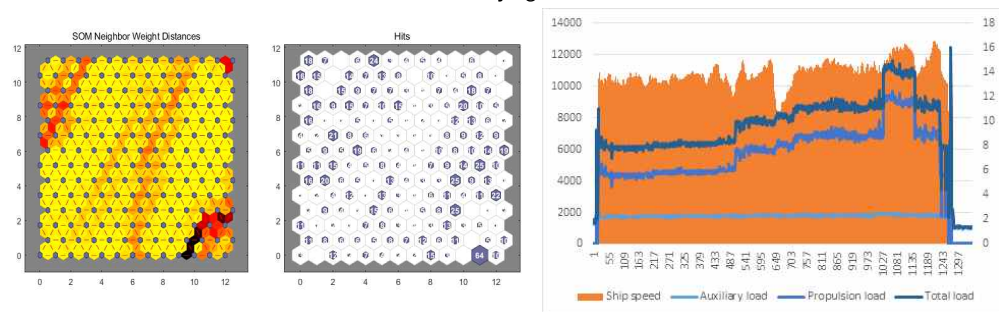
(az) voyage 52



(ba) voyage 53



(bb) voyage 54



(bc) voyage 55

Fig. 87 Results of SOM(14)

부 록 2 : 항차별 전력관리시스템 시뮬레이션 결과

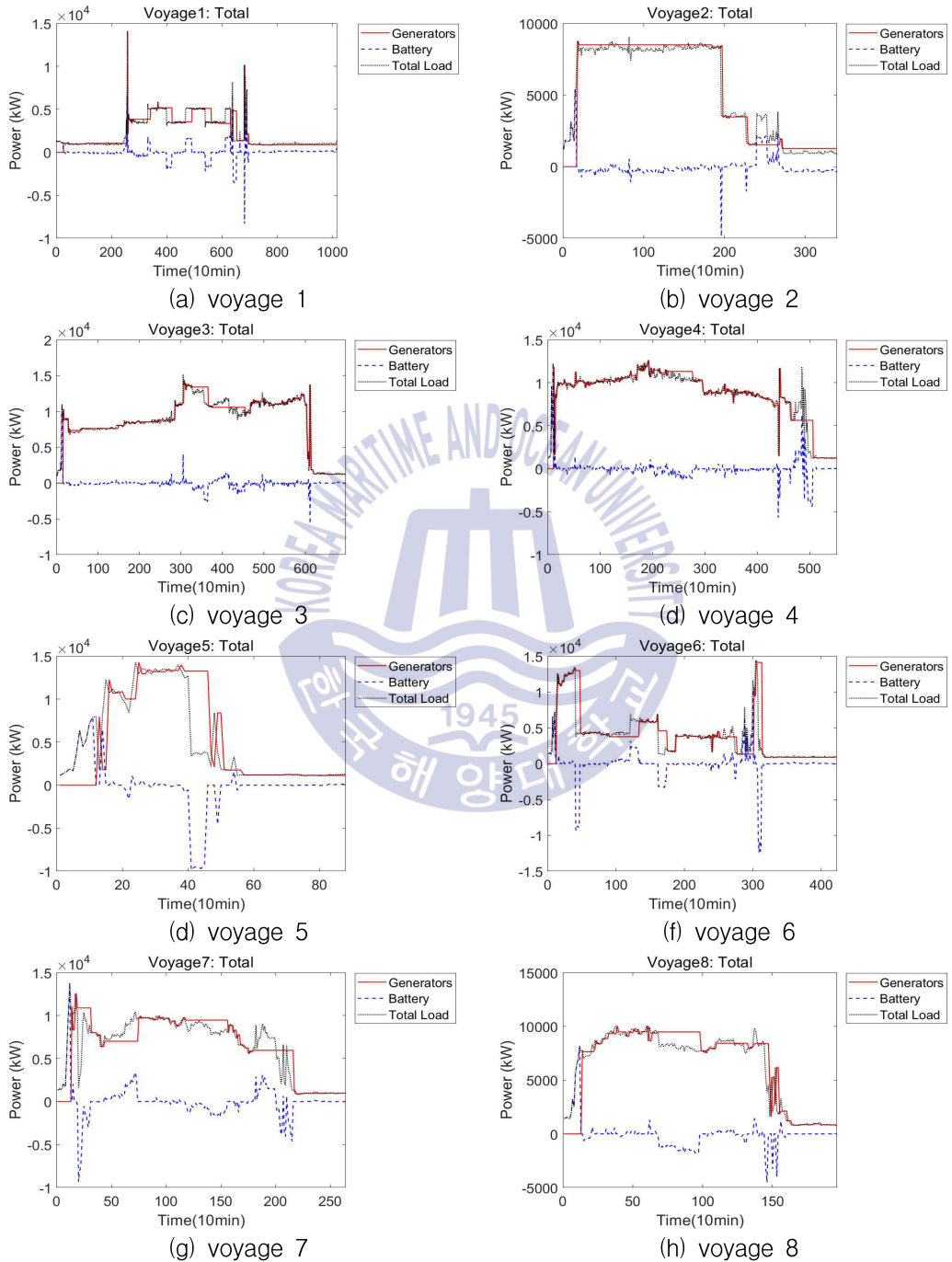
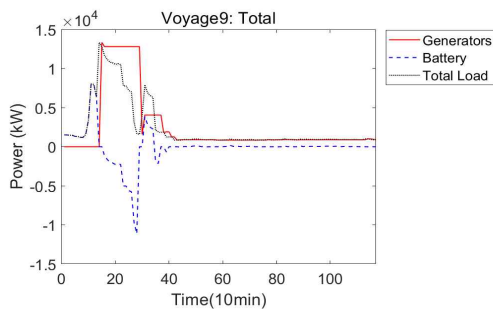
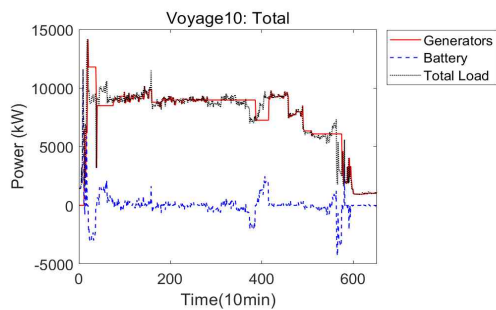


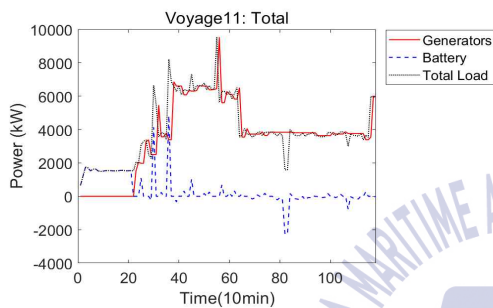
Fig. 88 Results of PMS simulation(1)



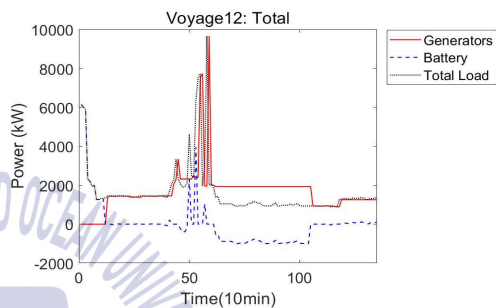
(i) voyage 9



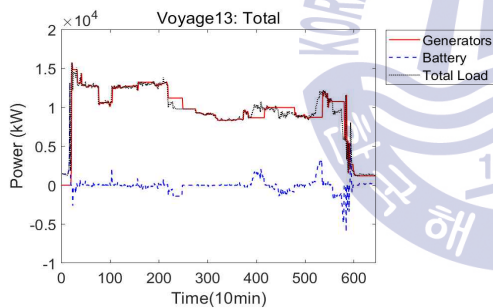
(j) voyage 10



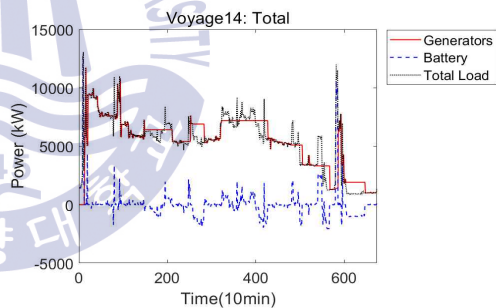
(k) voyage 11



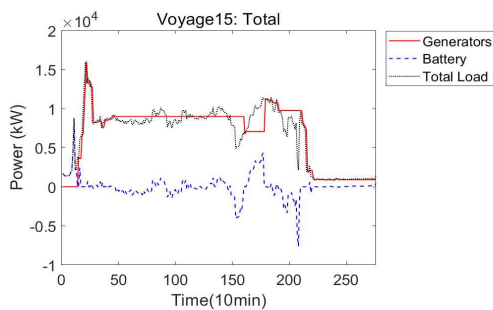
(l) voyage 12



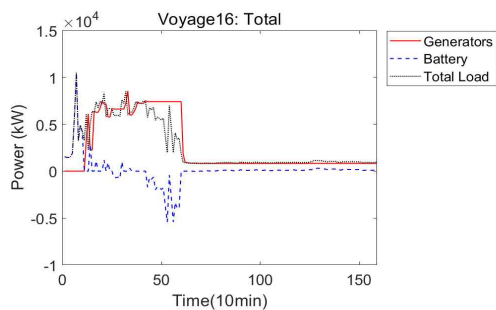
(m) voyage 13



(n) voyage 14



(o) voyage 15



(p) voyage 16

Fig. 89 Results of PMS simulation(2)

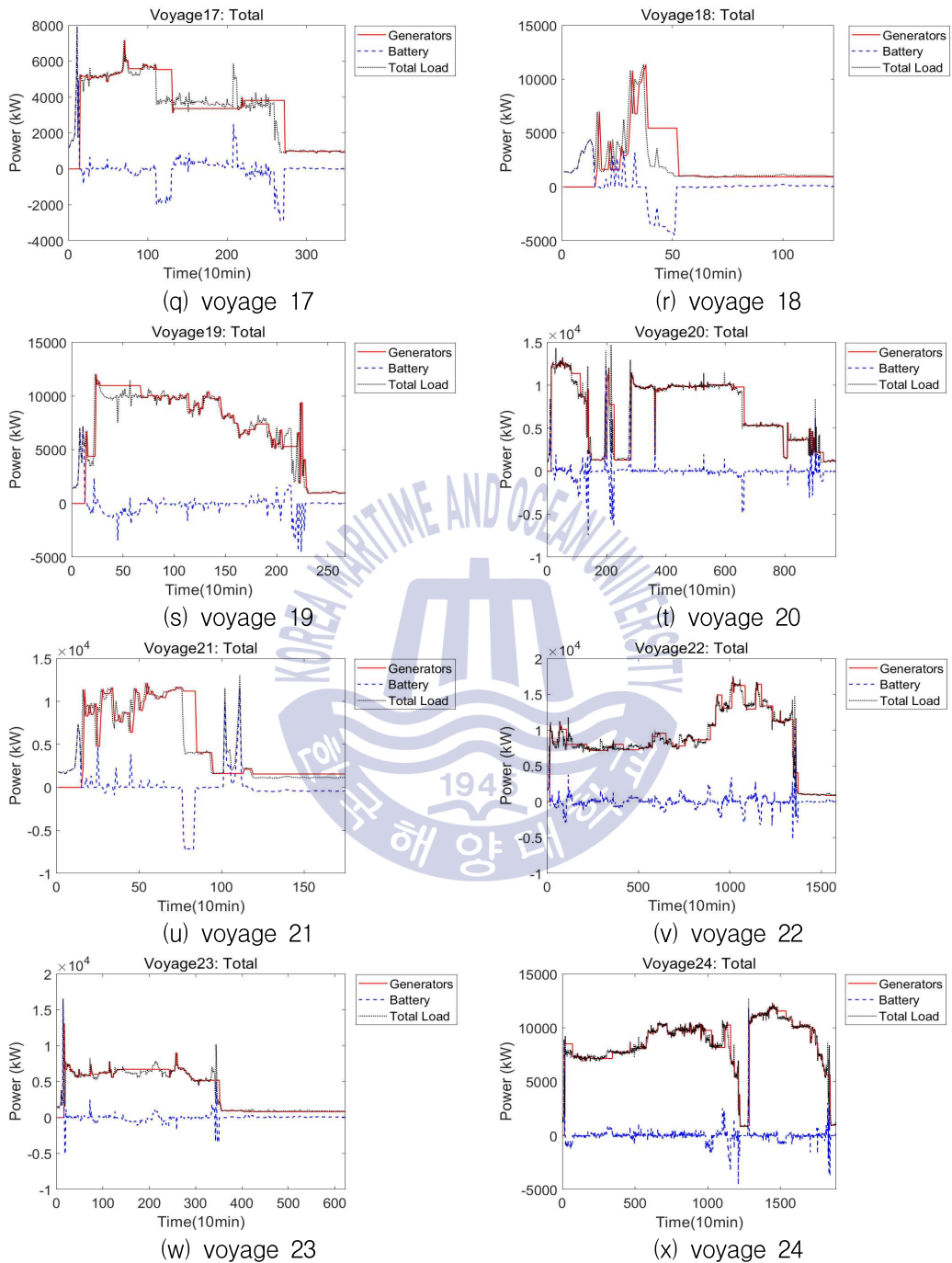


Fig. 90 Results of PMS simulation(3)

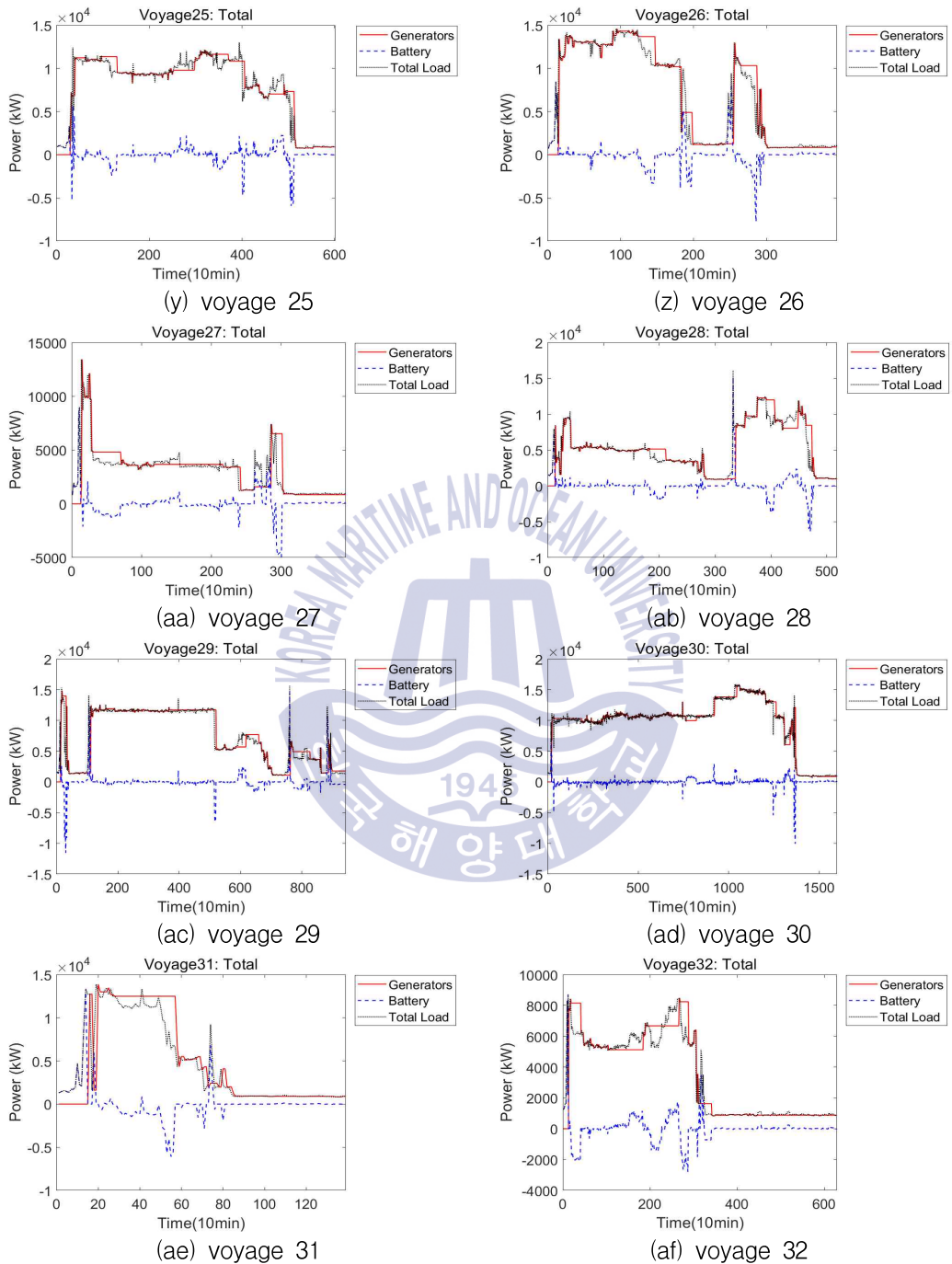


Fig. 91 Results of PMS simulation(4)

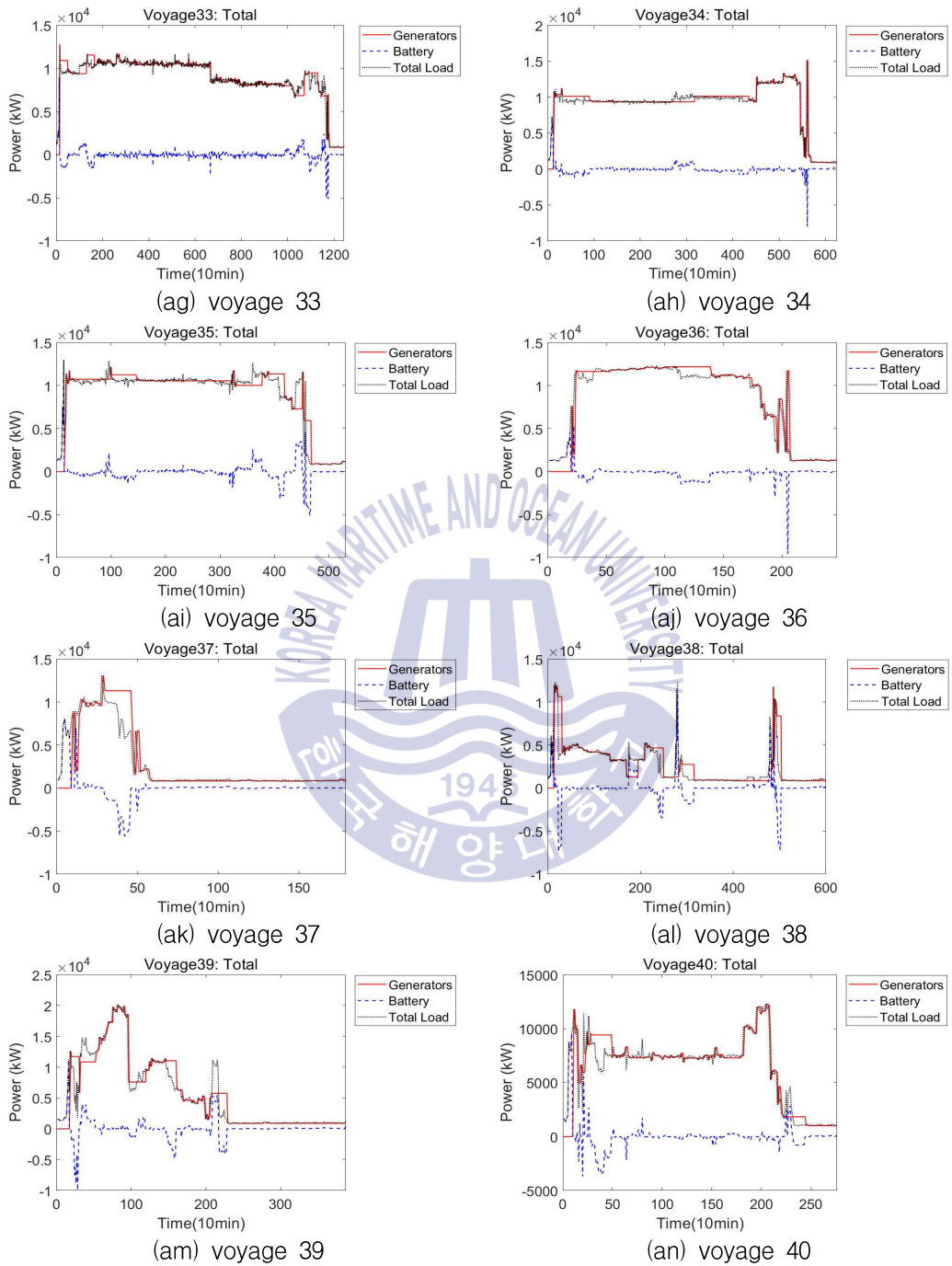


Fig. 92 Results of PMS simulation(5)

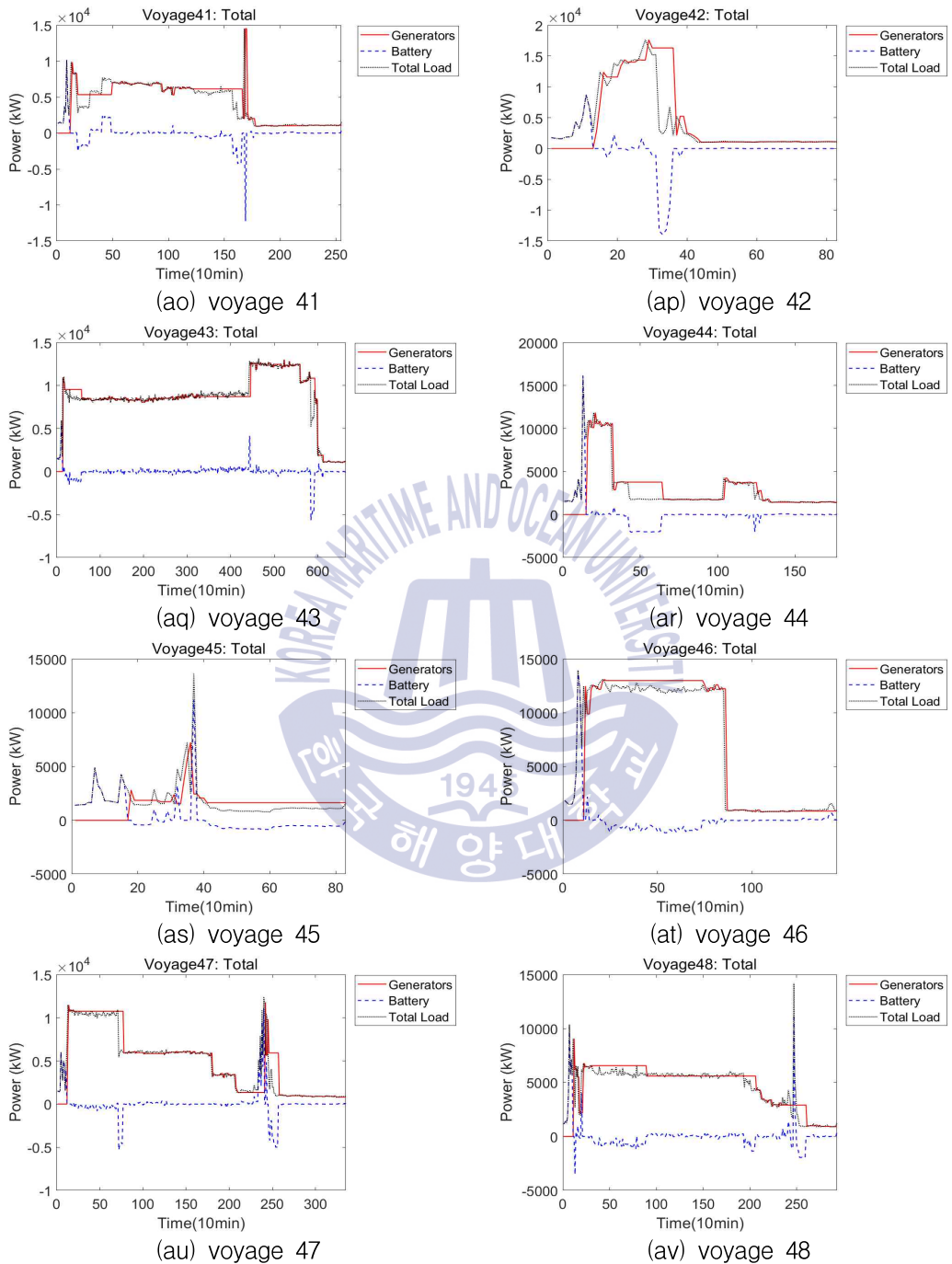


Fig. 93 Results of PMS simulation(6)

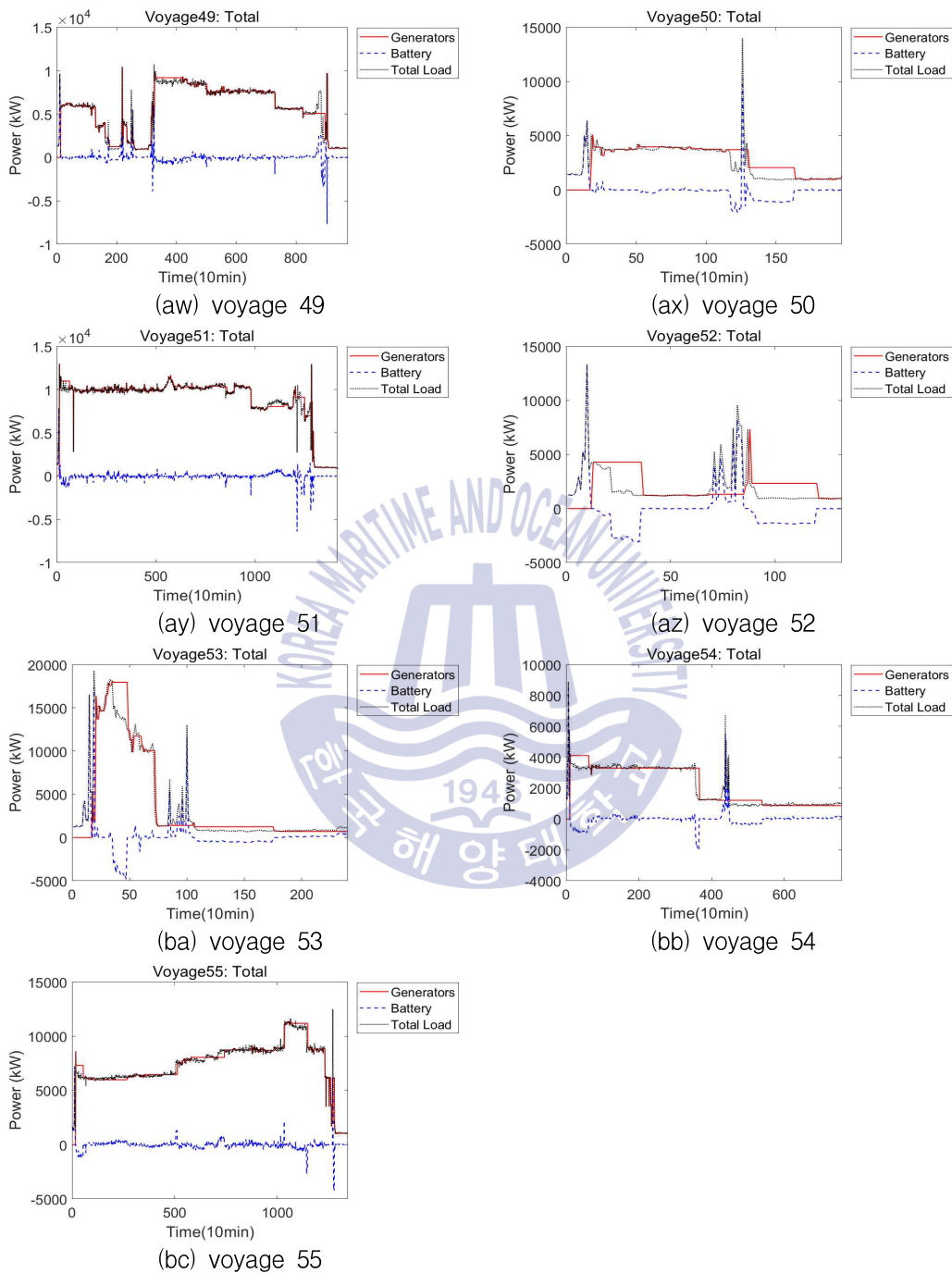


Fig. 94 Results of PMS simulation(7)

부 록 3 : 항차별 부하제어시스템 시뮬레이션 결과

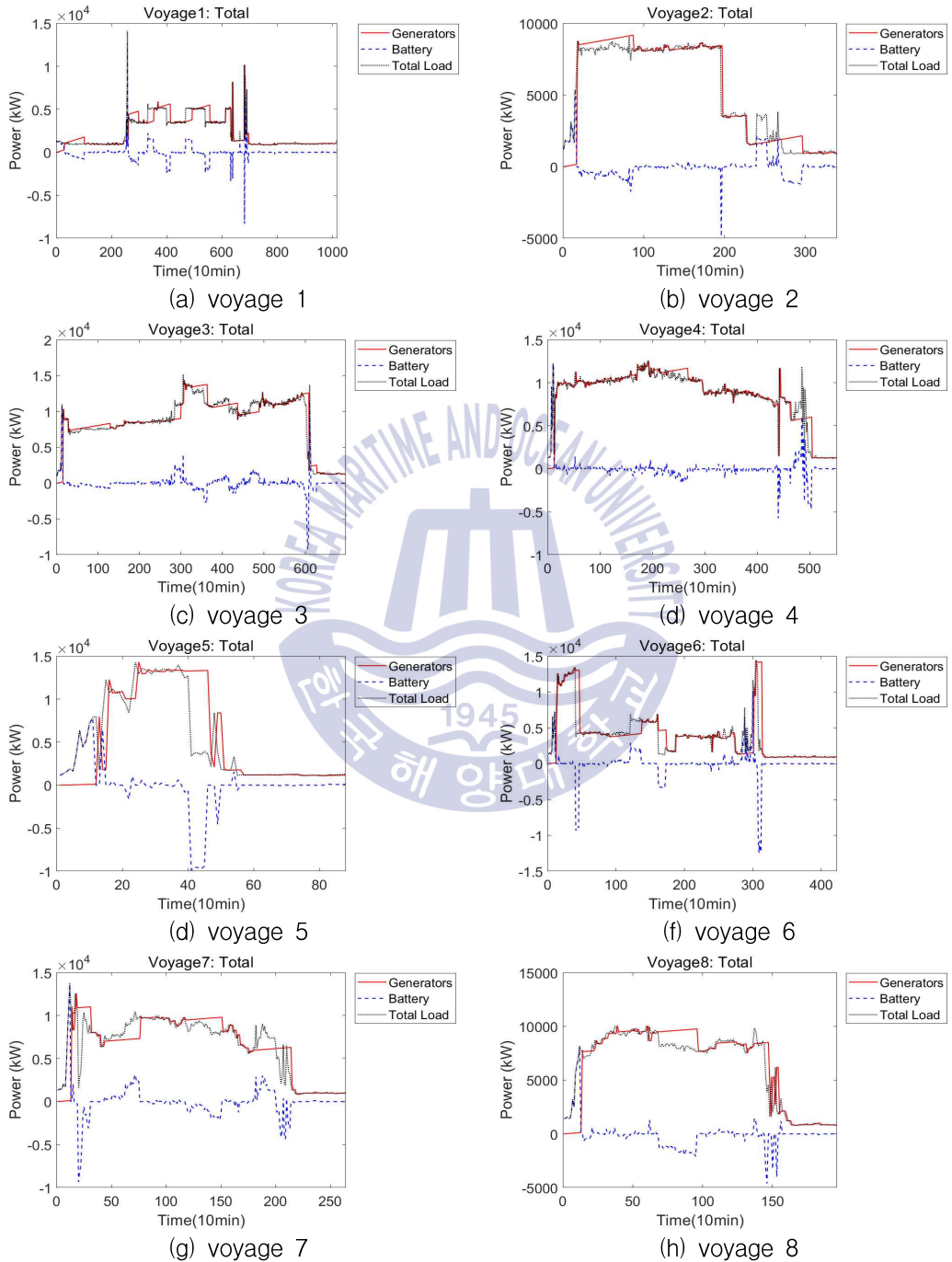
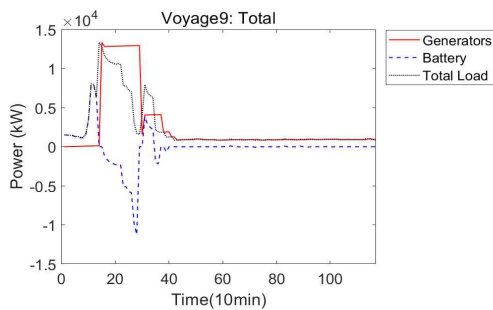
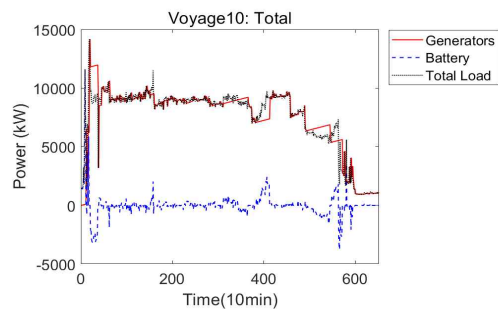


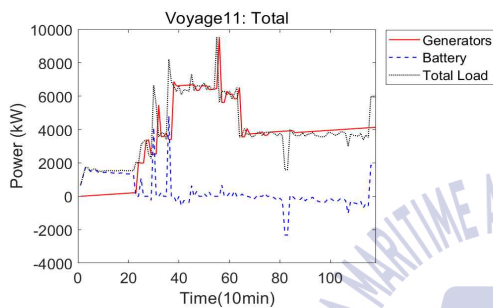
Fig. 95 Results of LCS simulation(1)



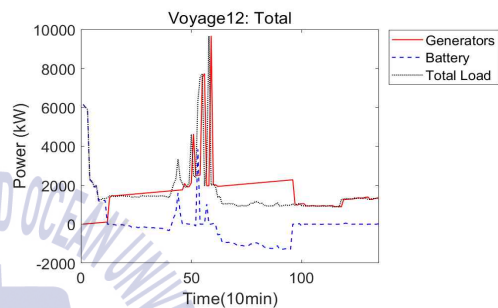
(i) voyage 9



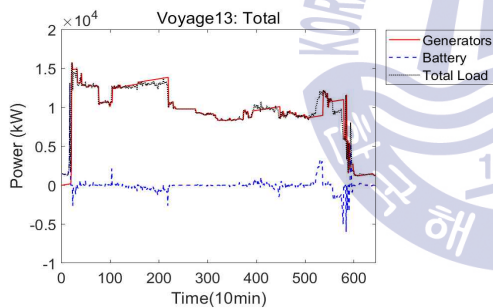
(j) voyage 10



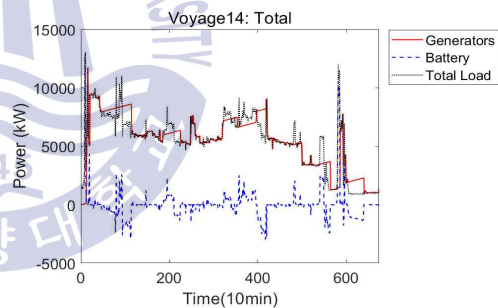
(k) voyage 11



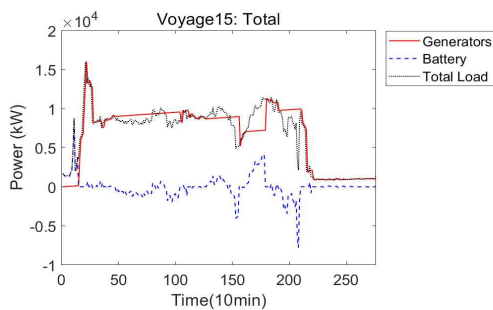
(l) voyage 12



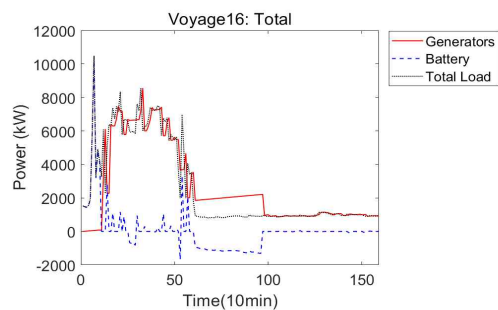
(m) voyage 13



(n) voyage 14



(o) voyage 15



(p) voyage 16

Fig. 96 Results of LCS simulation(2)

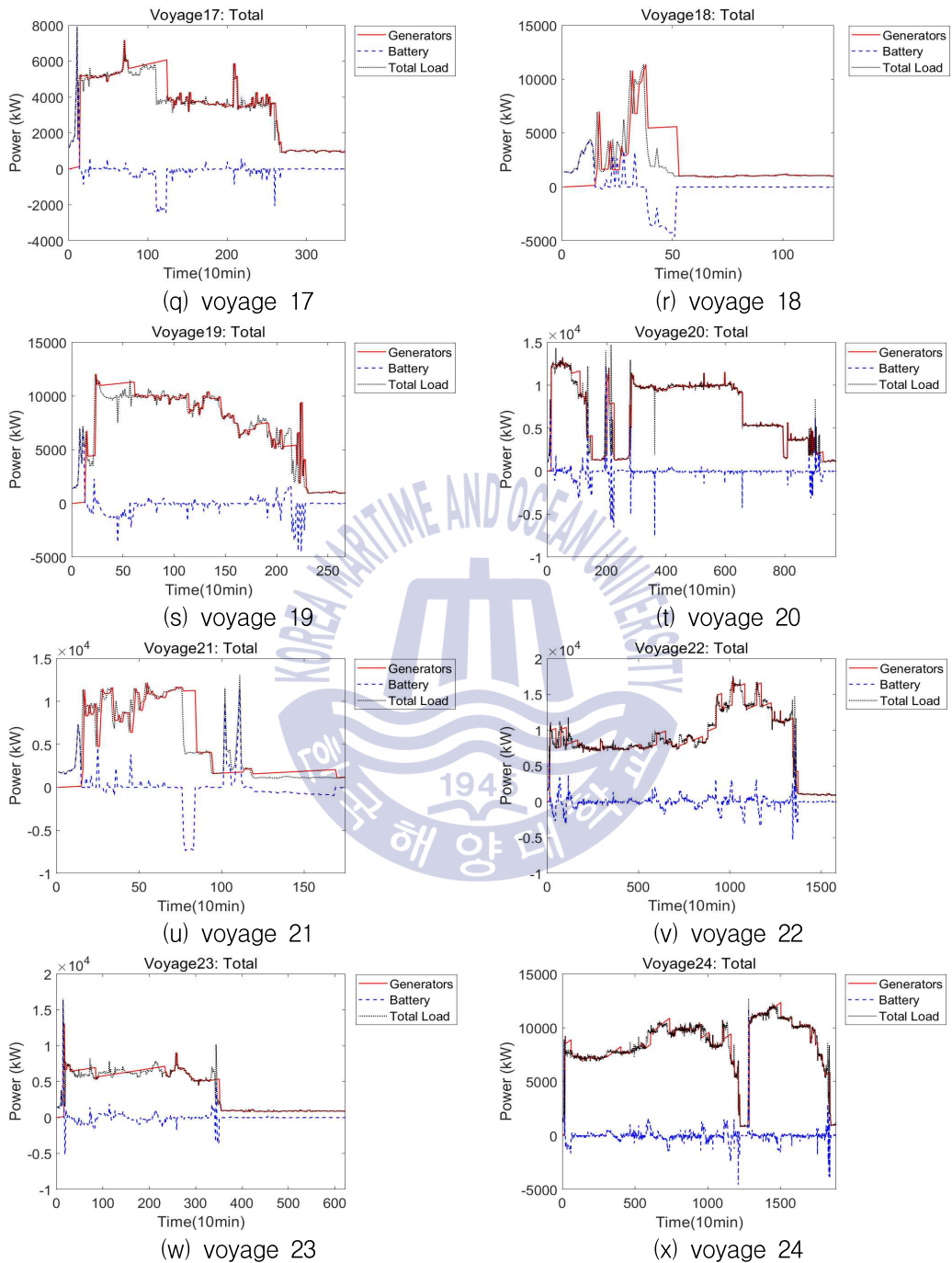


Fig. 97 Results of LCS simulation(3)

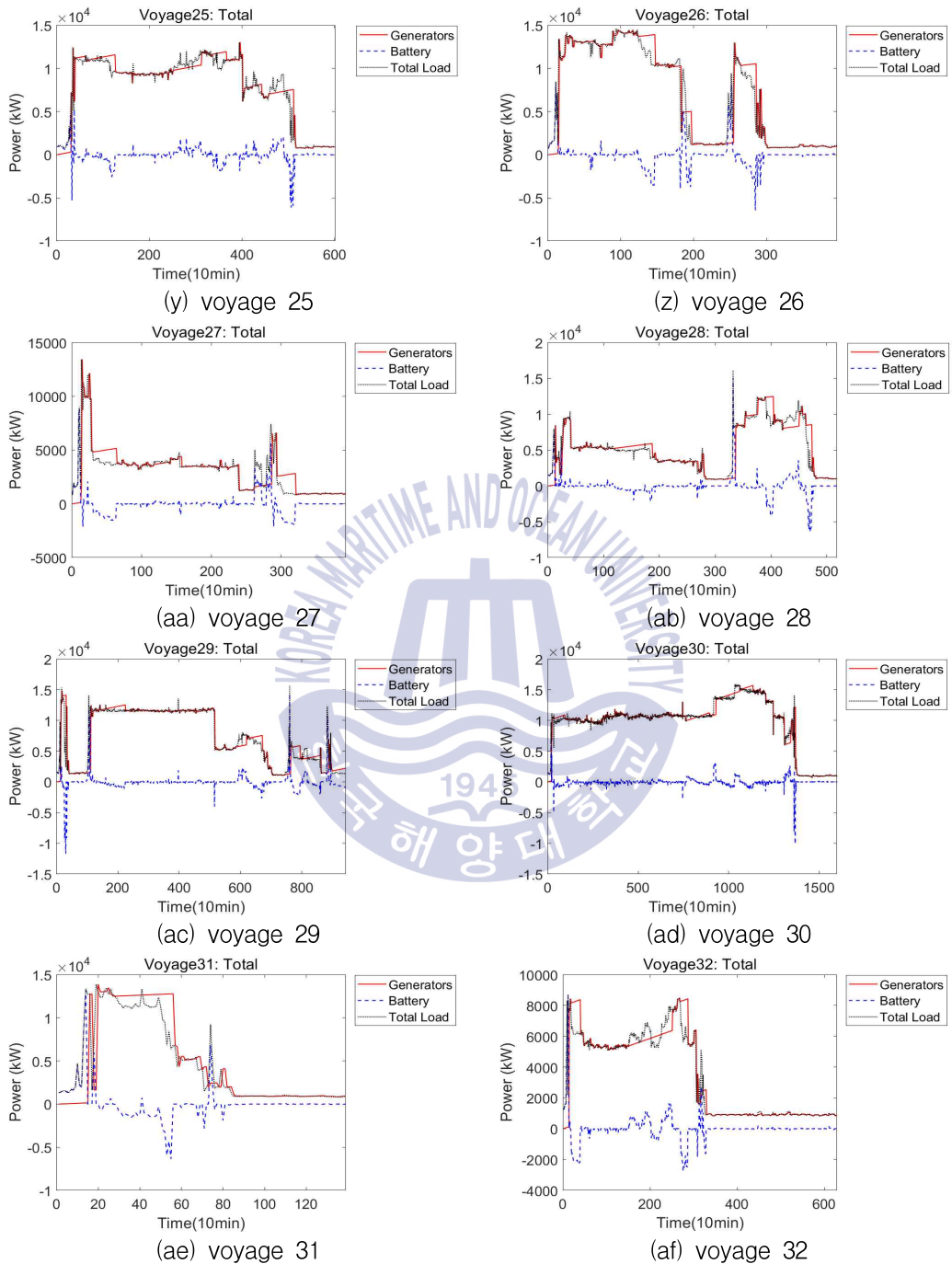


Fig. 98 Results of LCS simulation(4)

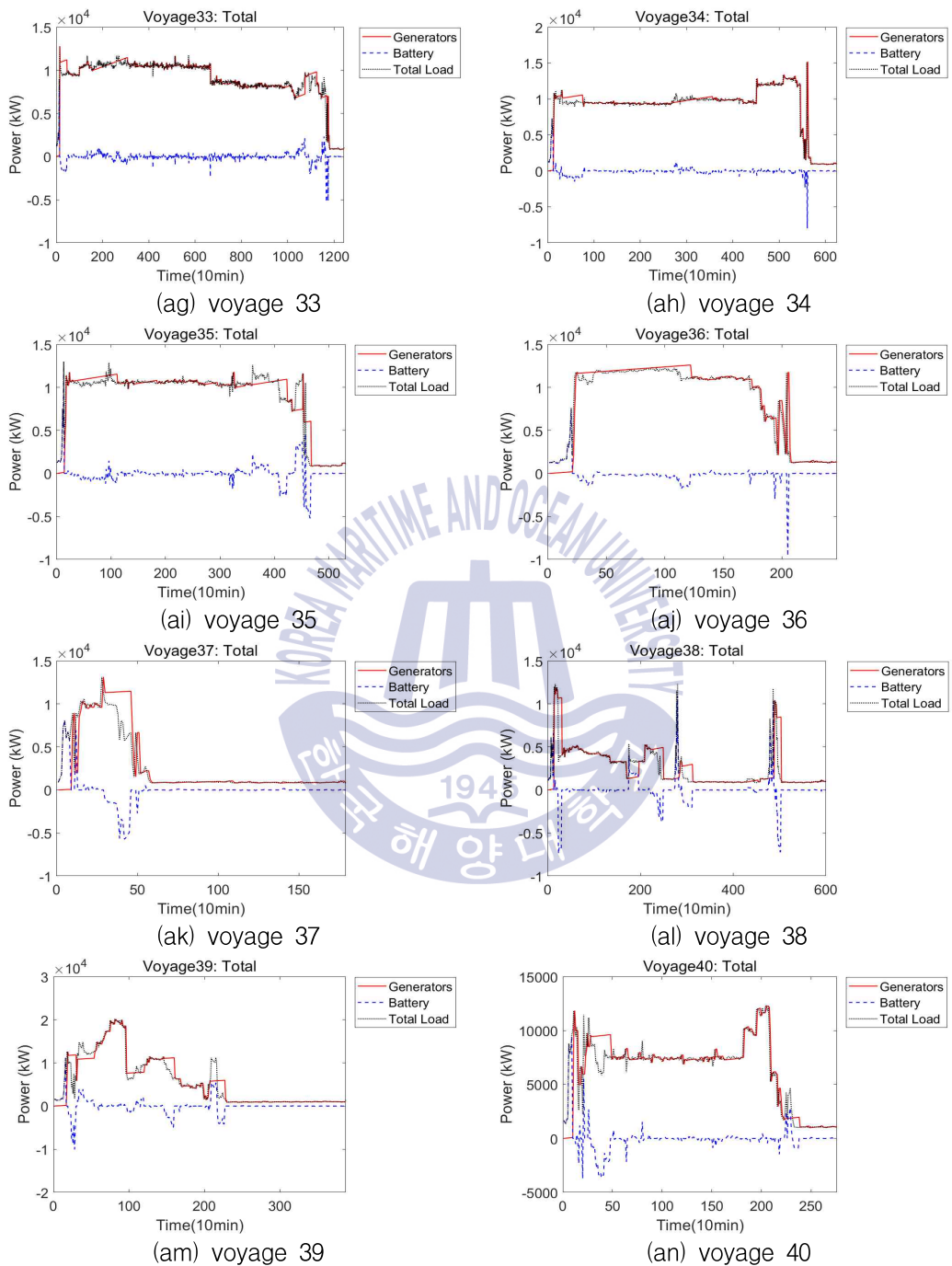


Fig. 99 Results of LCS simulation(5)

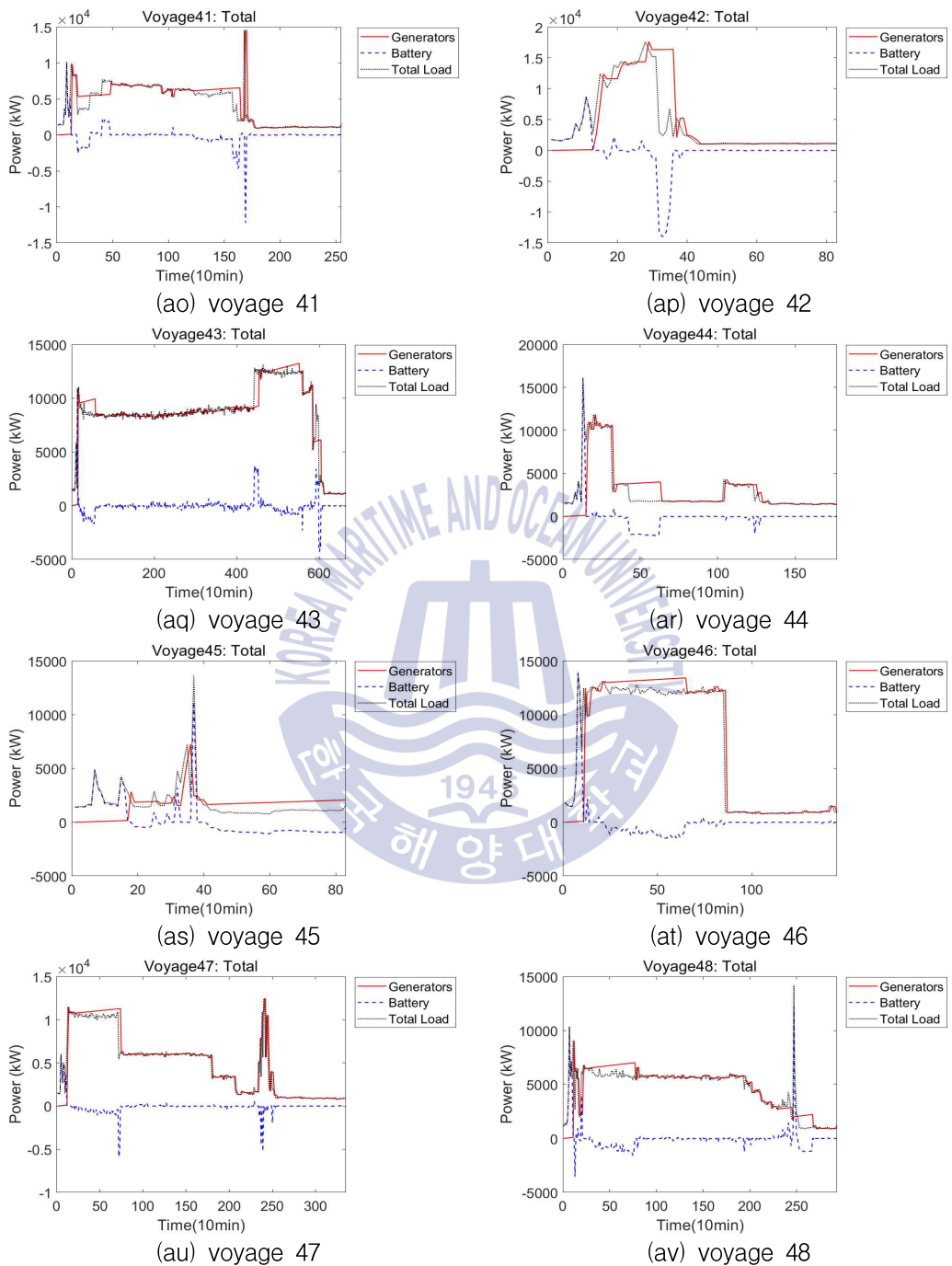


Fig. 100 Results of LCS simulation(6)

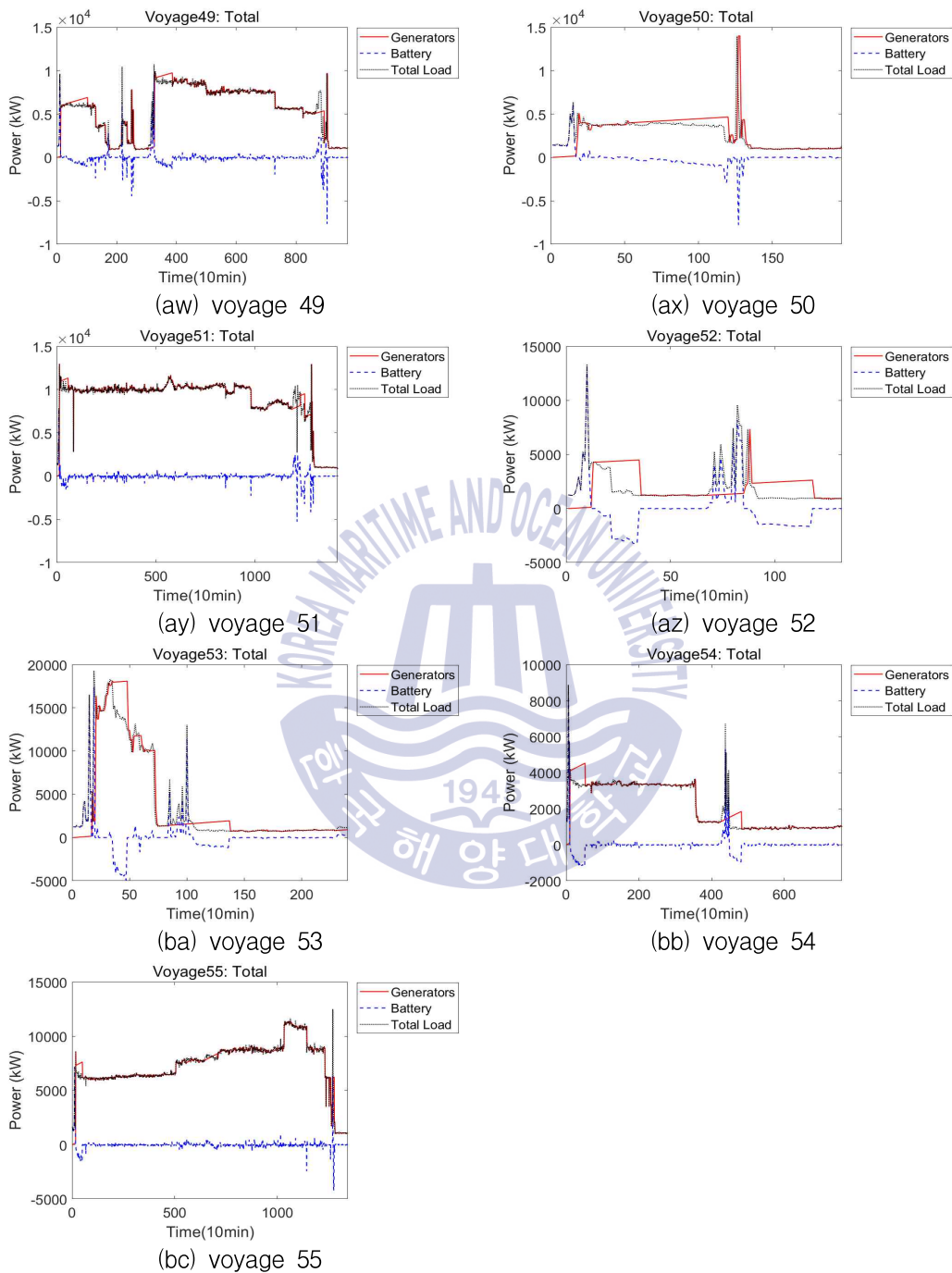


Fig. 101 Results of LCS simulation(7)

감사의 글

대학원 진학을 결심하고 E2E 연구실에 왔을 때가 엇그제 같은데 어느 새 학위논문에 감사의 글을 쓰게 되었습니다. 많은 분들의 도움으로 무사히 논문을 마무리 지을 수 있었기에 이 자리를 빌려 고마운 분들께 감사 인사를 드리고 싶습니다.

먼저 연구 방향과 방법에 대해 세심한 지도와 아낌없는 조언을 해주신 오진석 교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다. 여러모로 부족한 저에게 — 학문 지도뿐만 아니라 연구에 임함에 있어 필요한 마음가짐과 삶의 지혜를 가르쳐주셨습니다. 가르침을 마음깊이 새겨 인생의 지표로 삼겠습니다.

바쁘신 와중에도 연구에 대한 날카로운 지적과 따뜻한 조언을 주신 유희한 교수님, 매학기 가르침을 주시고 논문을 면밀하게 심사해주신 소명옥 교수님께 감사드립니다. 두 분 교수님의 가르침과 조언 덕분에 제 연구의 부족한 점을 볼 수 있었고, 보완하면서 많은 것을 배울 수 있었습니다. 그리고 바쁘신 와중에도 먼 거리를 마다하지 않고 와주셔서 꼼꼼한 조언을 주신 조관준 선임연구원님, 정성영 전문연구원님께 감사의 말씀을 전합니다. 아낌없는 조언으로 제 연구의 부족한 점을 보완할 수 있었습니다.

E2E 연구실의 든든한 실장인 헌석 오빠, 연구에 적극적인 영민, 매사에 꼼꼼한 민욱에게 많은 도움을 받았습니다. 함께 연구를 하면서 많이 배웠고, 또 연구와 자기발전에 대한 자극이 되었습니다. 그리고 대학원 입학 앞두고 있는 종학, 민승에게도 감사의 말을 전합니다. 좋은 분들을 많이 만날 수 있어서 행복하고 보람찬 시간이었습니다. 연구에서 좋은 결과를 거두시길 바랍니다. 또한 먼저 졸업하신 선배님들의 노력과 열정으로 꾸린 E2E 연구실의 환경 덕분에 다양한 연구를 경험해볼 수 있었습니다. 지면으로 다 언급하지 못한 선후배님들과 격려해주신 모든 분께 감사의 말씀을 드립니다.

마지막으로 항상 저를 믿어주시고 응원해주시는 아버지, 어머니, 동생 호영, 은주에게도 감사의 말을 전합니다. 지금까지처럼 우리 가족 모두가 건강하고 화목하길 기원합니다.

많은 감사한 분들의 도움과 가르침이 빛날 수 있도록 앞으로도 노력하고 정진하여 더 크게 성장하는 모습 보여드릴 수 있도록 하겠습니다.

감사합니다.

2019년 1월 5일

장재희 드림

